

**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**



**DISEÑO DE UN MEDIDOR INTELIGENTE CON FUNCIONES  
DE RESPUESTA A LA DEMANDA EN INFRAESTRUCTURAS  
DE MEDICIÓN AVANZADA**

*Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones*

**Autores:**

Jairo Andrés Armijos Abril

Álvaro Daniel Pesántez Alvarado

**Director:**

Dr. Luis Ismael Minchala Ávila

**CUENCA-ECUADOR**

**Marzo 2016**



# RESUMEN

En este trabajo se presenta la metodología de diseño de un medidor inteligente (SM) con funciones de respuesta a la demanda (DR). La arquitectura de hardware del prototipo de medidor inteligente utiliza, como unidad central de procesamiento, un circuito integrado dedicado ADE7753 para el cálculo del consumo energético. El prototipo de medidor inteligente se integra a una simulación de un sistema de distribución, interactuando con un sistema de gerenciamiento de energía (SGE) que monitorea el consumo de la red, formando una simulación de hardware en lazo. El SGE toma decisiones óptimas de consumo que envía al medidor inteligente que gestiona el uso de cargas programables y tipo HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado), como parte del concepto de respuesta a la demanda. El objetivo es cambiar la forma de utilizar la electricidad y mejorar la eficiencia energética con el fin de optimizar la gestión de la demanda.



# ABSTRACT

This paper describes the design methodology of a smart meter (SM) with functions of demand response (DR). The smart meter prototype's hardware architecture uses a central processing unit with a dedicated ADE7753 integrated circuit to calculate the energy consumption. The smart meter prototype integrates itself to a distribution system simulation, interacting with an energy management system (EMS) that monitors the consumption of the network, forming a loop simulation hardware. The EMS makes optimal consumption decisions and sends it to the smart meter that manages the use of programmable and dimmable charges as part of the concept of a demanded response. The goal is to change the way you use electricity and to improve energy efficiency in order to optimize the management of demand.



# INDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>JUSTIFICACION.....</b>	<b>15</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>17</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>18</b>
<b>1.3. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>19</b>
<b>1.4. CONTRIBUCIÓN DE LA TESIS.....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>22</b>
<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1. REDES INTELIGENTES .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2. RESPUESTA A LA DEMANDA .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3. EL MEDIDOR INTELIGENTE.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.1. MEDIDOR DE DISCO .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2. MEDIDOR DE ELECTRÓNICO.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.3. MEDIDOR INTELIGENTE .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.4. UNIDAD DE MEDICIÓN DE ENERGÍA.....</b>	<b>31</b>
<b>2.4. HARDWARE EN LAZO (HIL).....</b>	<b>32</b>
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>34</b>
<b>DISEÑO DEL MEDIDOR INTELIGENTE.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1. ESTRUCTURA DE HARDWARE DEL MEDIDOR INTELIGENTE .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2. ADQUISICIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES DE ENTRADA..</b>	<b>35</b>
<b>3.2.1. UNIDAD DE MEDICIÓN DE VOLTAJE .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.2. UNIDAD DE MEDICIÓN DE CORRIENTE.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.3. FILTRO ANTIALIASING .....</b>	<b>42</b>



<b>3.3.</b>	<b>ADE7753 .....</b>	<b>44</b>
<b>3.3.1.</b>	<b>CÁLCULO DE LA POTENCIA ACTIVA.....</b>	<b>45</b>
<b>3.3.2.</b>	<b>CÁLCULO DE LA POTENCIA REACTIVA.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.3.</b>	<b>INTERFAZ DE COMUNICACIÓN SERIAL .....</b>	<b>47</b>
<b>3.3.4.</b>	<b>OPERACIÓN DE ESCRITURA Y LECTURA EN LOS REGISTROS DEL ADE7753 .....</b>	<b>47</b>
<b>3.3.5.</b>	<b>CALIBRACIÓN DEL ADE7753.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.6.</b>	<b>CALIBRACIÓN DE POTENCIA Y FASE (WGAIN Y APOS).....</b>	<b>49</b>
<b>3.4.</b>	<b>UNIDAD DE PROCESAMIENTO .....</b>	<b>52</b>
<b>3.5.</b>	<b>COMUNICACIÓN ENTRE EL MEDIDOR DE ENERGÍA Y EL MÓDULO ARDUINO. ....</b>	<b>54</b>
<b>3.6.</b>	<b>DISEÑO PCB.....</b>	<b>55</b>
<b>3.7.</b>	<b>PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....</b>	<b>57</b>
<b>3.7.1.</b>	<b>PRUEBAS REALIZADAS CON EL SENSOR DE CORRIENTE FHS40-P SP600 57</b>	
<b>3.7.2.</b>	<b>PRUEBAS REALIZADAS CON EL MEDIDOR DE ENERGÍA ADE7753. 59</b>	
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>62</b>
<b>SIMULACIÓN DEL HARDWARE EN LAZO INCORPORANDO EL PROTOTIPO DE MEDIDOR INTELIGENTE .....</b>		<b>62</b>
<b>4.1.</b>	<b>SISTEMA HIL DESARROLLADO .....</b>	<b>62</b>
<b>4.2.</b>	<b>SIMULACIÓN DE LA RED DE INTERACCIÓN DEL MEDIDOR INTELIGENTE .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2.1.</b>	<b>RED ELÉCTRICA Y TRANSFORMADOR DE SUBESTACIÓN.....</b>	<b>63</b>
<b>4.2.2.</b>	<b>TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.....</b>	<b>66</b>
<b>4.3.</b>	<b>SIMULACIÓN DE LAS VIVIENDAS.....</b>	<b>68</b>
<b>4.3.1.</b>	<b>VIVIENDA TIPO I .....</b>	<b>69</b>
<b>4.3.2.</b>	<b>VIVIENDA TIPO II .....</b>	<b>75</b>
<b>4.3.3.</b>	<b>VIVIENDA TIPO III .....</b>	<b>79</b>
<b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>83</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>83</b>
<b>5.1.</b>	<b>LIMITACIONES .....</b>	<b>83</b>
<b>5.2.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>83</b>
<b>5.3.</b>	<b>TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>84</b>



UNIVERSIDAD DE CUENCA

<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>87</b>



# INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 SERVICIOS INTEGRADOS EN UN SISTEMA SMART GRID .....	24
FIGURA 2.2 MEDIDOR TRADICIONAL DE DISCO.....	28
FIGURA 2.3 MEDIDOR ELECTRÓNICO .....	28
FIGURA 2.4 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN MEDIDOR INTELIGENTE .....	29
FIGURA 2.5 SENSOR DE VOLTAJE .....	30
FIGURA 2.6 CONCEPTO ENVUELTO EN UN SISTEMA HARDWARE EN LAZO (HIL).....	33
FIGURA 3.1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MEDIDOR INTELIGENTE.....	34
FIGURA 3.2 ESTRUCTURA DE UN MEDIDOR INTELIGENTE .....	35
FIGURA 3.3 ARQUITECTURA DEL HARDWARE DE MEDICIÓN DE ENERGÍA .....	36
FIGURA 3.4 SENSOR DE VOLTAJE IMPLEMENTADO .....	37
FIGURA 3.5 SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR DE VOLTAJE .....	38
FIGURA 3.6 SENSOR DE CORRIENTE.....	38
FIGURA 3.7 CIRCUITO RECOMENDADO PARA EL SENSOR DE CORRIENTE FHS 40P/SP600....	39
FIGURA 3.8 SENTIDO DE CIRCULACIÓN DE LA CORRIENTE EN EL SENSOR .....	40
FIGURA 3.9 CONDUCTOR UBICADO SOBRE EL SENSOR DE CORRIENTE .....	40
FIGURA 3.10 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE SALIDA DEL SENSOR DE CORRIENTE.....	41
FIGURA 3.11 SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO .....	42
FIGURA 3.12 ESQUEMA DEL FILTRO ANTIALIASING .....	43
FIGURA 3.13 RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL FILTRO .....	43
FIGURA 3.14 DIAGRAMA DE BLOQUES FUNCIONAL DEL ADE7753.....	44
FIGURA 3.15 PCB DEL MEDIDOR DE CONSUMO ENERGÉTICO BASADO EN EL ADE7753 .....	45
FIGURA 3.16 PROCESO PARA EL CÁLCULO DE LA POTENCIA REACTIVA .....	46
FIGURA 3.17 OPERACIÓN DE ESCRITURA .....	48
FIGURA 3.18 OPERACIÓN DE LECTURA .....	48
FIGURA 3.19 CALIBRACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE LA POTENCIA ACTIVA.....	49
FIGURA 3.20 ESTRUCTURA DE HARDWARE DEL MEDIDOR INTELIGENTE .....	52
FIGURA 3.21 DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO IMPLEMENTADO EN EL MÓDULO ARDUINO MEGA .....	53
FIGURA 3.22 ESQUEMA DE CONEXIÓN DEL BUS SPI DEL ADE7753 Y EL ARDUINO MEGA .....	55
FIGURA 3.23 ESQUEMA ELÉCTRICO PARA EL SENSOR DE CORRIENTE .....	55
FIGURA 3.24 DISEÑO FINAL DEL PCB - SENSOR DE CORRIENTE .....	56
FIGURA 3.25 ESQUEMA ELÉCTRICO DEL ADE7753.....	56
FIGURA 3.26 DISEÑO FINAL DEL PCB - ADE7753.....	57
FIGURA 3.27 MEDICIONES REALIZADAS EN EL SENSOR DE CORRIENTE.....	58
FIGURA 3.28 SEÑAL DE 504 mV, IRMS = 30A, VRMS = 120V, P= 3600W .....	60
FIGURA 3.29 SEÑAL DE 252 mV, IRMS = 15A, VRMS = 120V, P= 1800WATTS.....	60
FIGURA 3.30 SEÑAL DE 150 mV, IRMS = 10A, VRMS = 120V, P = 1200WATTS .....	60
FIGURA 3.31 SEÑAL DE 23.2 mV, IRMS = 1A, VRMS = 120V, P = 120WATTS.....	60
FIGURA 3.32 SEÑAL DE 12.4 mV, IRMS = 0A, VRMS = 120V, P = 0WATTS .....	61
FIGURA 4.1 PLATAFORMA DE ENSAYO DEL SISTEMA HIL.....	63



<b>FIGURA 4.2 BLOQUE THREE-PHASE SOURCE .....</b>	<b>64</b>
<b>FIGURA 4.3 DIAGRAMA UNIFILAR DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN SIMULADA.....</b>	<b>64</b>
<b>FIGURA 4.4 VOLTAJE RMS EN CADA FASE .....</b>	<b>65</b>
<b>FIGURA 4.5 BLOQUE THREE-PHASE PI SECTION LINE.....</b>	<b>65</b>
<b>FIGURA 4.6 SECCIÓN PI.....</b>	<b>66</b>
<b>FIGURA 4.7 TRANSFORMADOR RESIDENCIAL .....</b>	<b>66</b>
<b>FIGURA 4.8 VOLTAJE SUMINISTRADO AL VECINDARIO .....</b>	<b>67</b>
<b>FIGURA 4.9 VECINDARIO DE INTERACCIÓN DEL MEDIDOR INTELIGENTE.....</b>	<b>68</b>
<b>FIGURA 4.10 DIAGRAMA DE BLOQUES VIVIENDA TIPO I.....</b>	<b>69</b>
<b>FIGURA 4.11 MEDIDOR INTELIGENTE EN FUNCIONAMIENTO .....</b>	<b>70</b>
<b>FIGURA 4.12 SISTEMA DE CONTROL DIFUSO DEL MEDIDOR INTELIGENTE .....</b>	<b>71</b>
<b>FIGURA 4.13 FUNCIÓN DE MEMBRESÍA "HORARIOS" .....</b>	<b>72</b>
<b>FIGURA 4.14 FUNCIÓN DE MEMBRESÍA "CONSUMO" .....</b>	<b>72</b>
<b>FIGURA 4.15 FUNCIÓN DE MEMBRESÍA "PRIORIDADES" .....</b>	<b>73</b>
<b>FIGURA 4.16 FUNCIÓN DE MEMBRESÍA "PRECIO" .....</b>	<b>73</b>
<b>FIGURA 4.17 SALIDAS DEL CONTROLADOR DIFUSO .....</b>	<b>74</b>
<b>FIGURA 4.18 RESULTADO DEL MÉTODO DE MANEJO DE ENERGÍA EN CARGAS TIPO HVAC EN UN PROTOTIPO DE VIVIENDA USANDO EL MEDIDOR INTELIGENTE CON FUNCIONES DE RESPUESTA A LA DEMANDA.....</b>	<b>74</b>
<b>FIGURA 4.19 RESULTADO DEL MÉTODO DE MANEJO DE ENERGÍA EN UN PROTOTIPO DE VIVIENDA USANDO EL MEDIDOR INTELIGENTE CON FUNCIONES DE RESPUESTA A LA DEMANDA .....</b>	<b>75</b>
<b>FIGURA 4.20 ESTRUCTURA INTERNA DE LAS VIVIENDAS TIPO II.....</b>	<b>76</b>
<b>FIGURA 4.21 SALIDAS DEL CONTROLADOR DIFUSO PARA LAS VIVIENDAS TIPO II .....</b>	<b>76</b>
<b>FIGURA 4.22 CARGAS PROGRAMABLES SIMULADAS.....</b>	<b>77</b>
<b>FIGURA 4.23 CONSUMO DE LA LAVADORA NORMAL Y POSTERGADO .....</b>	<b>78</b>
<b>FIGURA 4.24 CONSUMO NORMAL Y BAJO LAS FUNCIONES DE RESPUESTA A LA DEMANDA PARA "HOUSE1" .....</b>	<b>79</b>
<b>FIGURA 4.25 CONSUMO NORMAL Y BAJO LAS FUNCIONES DE RESPUESTA A LA DEMANDA PARA "HOUSE2" .....</b>	<b>79</b>
<b>FIGURA 4.26 CONSUMO NORMAL Y BAJO LAS FUNCIONES DE RESPUESTA A LA DEMANDA PARA "HOUSE3" .....</b>	<b>80</b>
<b>FIGURA 4.27 CONSUMO NORMAL Y BAJO LAS FUNCIONES DE RESPUESTA A LA DEMANDA PARA "HOUSE4" .....</b>	<b>81</b>
<b>FIGURA 4.28 CONSUMO NORMAL Y BAJO LAS FUNCIONES DE RESPUESTA A LA DEMANDA PARA "HOUSE5" .....</b>	<b>81</b>
<b>FIGURA 4.29 CONSUMO NORMAL Y BAJO LAS FUNCIONES DE RESPUESTA A LA DEMANDA PARA TODO EL VECINDARIO .....</b>	<b>82</b>





### Cláusula de propiedad intelectual

Yo, Jairo Andrés Armijos Abril, autor de la tesis "Diseño de un medidor inteligente con funciones de respuesta a la demanda en infraestructuras de medición avanzada", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 31 de marzo de 2016

Jairo Andrés Armijos Abril  
C.I: 0104188834



### Cláusula de propiedad intelectual

Yo, Álvaro Daniel Pesántez Alvarado, autor de la tesis "Diseño de un medidor inteligente con funciones de respuesta a la demanda en infraestructuras de medición avanzada", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 31 de marzo de 2016

Álvaro Daniel Pesántez Alvarado  
C.I. 0105117576



### Cláusula de derechos de autor

Yo, Jairo Andrés Armijos Abril, autor de la tesis "Diseño de un medidor inteligente con funciones de respuesta a la demanda en infraestructuras de medición avanzada", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 31 de marzo de 2016

Jairo Andrés Armijos Abril  
C.I: 0104188834



### Cláusula de derechos de autor

Yo, Álvaro Daniel Pesántez Alvarado, autor de la tesis "Diseño de un medidor inteligente con funciones de respuesta a la demanda en infraestructuras de medición avanzada", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 31 de marzo de 2016

Álvaro Daniel Pesántez Alvarado  
C.I: 0105117576



# AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Luis Ismael Minchala Ávila quien con toda su dedicación y conocimientos sobre el tema nos brindó un gran soporte para la culminación de este proyecto.

Al Dr. Luis González por su valioso aporte y sus recomendaciones que ayudaron a iniciar el proyecto y establecer las bases correctas para el mismo.

A nuestros amigos por los buenos momentos compartidos y el apoyo mutuo en cada faceta de la carrera.

A los profesores por su dedicación, enseñanza y conocimiento transmitido en este proceso.

A todas las personas que siempre nos han apoyado de varias maneras, consiguiendo así finalizar esta tesis y toda esta larga carrera universitaria.



# DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mis padres, Armando Armijos y Jenny Abril, a mis hermanas Elisa Armijos y Luciana Armijos, quienes con todo el apoyo, paciencia y consejos me ayudaron a alcanzar este peldaño. También a mis amigos y profesores, que estuvieron en este largo proceso y colaboraron en muchos de los conocimientos que he adquirido a lo largo de la carrera.

Jairo



# DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a Jehová el creador de todo lo que existe, a mis padres y hermanos que siempre me ayudaron y me apoyaron para alcanzar estas metas que hoy las he logrado, a mis amigos que junto con ellos fuimos avanzando paso a paso hasta llegar a la culminación de esta carrera.

Daniel



# JUSTIFICACION

La energía eléctrica es una variable dominante dentro del aspecto económico. Esta es usada para encender cargas domésticas, comerciales e industriales; transformándose en un elemento clave dentro del desarrollo económico de todos los países.

En los últimos años ha existido un incremento importante de la demanda de energía eléctrica, viéndose reflejado en el desarrollo e implementación de grandes proyectos hidroeléctricos y de energías renovables en muchos países. Sin embargo, si bien es importante garantizar la fiabilidad de la red eléctrica a través de sistemas de generación de energía, también es importante brindar herramientas que contribuyan al mejoramiento del sistema de distribución, para propósito de ahorro energético y manejo avanzado de energía. Esto supone, redefinir el concepto de la red eléctrica y la participación que tienen los consumidores o usuarios finales dentro de la red.

Con el objetivo de lograr una red más robusta, que facilite la integración de energías renovables y proporcione información detallada de la demanda de energía, en algunos países ya se han implementado soluciones de infraestructura de medición avanzada (IMA) como parte fundamental de las denominadas Redes Eléctricas Inteligentes. Dotando a los usuarios finales de dispositivos inteligentes que realicen un gerenciamiento apropiado del consumo eléctrico.

Por tales motivos, en este trabajo se plantea el desarrollo de un medidor de consumo energético que integre comandos de respuesta a la demanda para optimizar el consumo energético residencial. El objetivo es cambiar la forma de utilizar la electricidad y mejorar la eficiencia energética con el fin de optimizar la gestión de la demanda.





# OBJETIVOS

## GENERAL

Diseño de un medidor inteligente que integre comandos de respuesta a la demanda para optimizar el consumo energético residencial y aumentar la fiabilidad del sistema de distribución.

## ESPECÍFICOS

1. Construir un prototipo para realizar pruebas de concepto.
2. Monitorear el consumo energético.
3. Realizar un sistema de control de cargas domésticas.
4. Simular una red de medidores Inteligentes.
5. Evaluar el desempeño del prototipo a comandos de respuesta a la demanda.



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Introducción

La forma en la que se distribuye la energía eléctrica a los hogares, no ha cambiado radicalmente desde sus inicios hace aproximadamente un siglo. Unidades de generación grandes transmiten la energía por redes de alta tensión con extensiones de cientos de kilómetros, hasta llegar a los consumidores a través de los sistemas de distribución en bajo voltaje.

Esta manera tradicional de distribución de energía se ha utilizado en la mayor parte del planeta. Sin embargo, el concepto de las redes eléctricas inteligentes (SG, por sus siglas en inglés) se encuentra revolucionando el mercado de la energía. Las SGs surgen en base a ciertas necesidades y deficiencias que deja el sistema tradicional de distribución, el ahorro energético, la constante necesidad de la incorporación de energías renovables en la red y un suministro más confiable y seguro, aumentando así la eficiencia de la red y disminuyendo la vulnerabilidad de la red ante desastres naturales o ataques.

Las SGs proporcionan flexibilidad a la red eléctrica, ya que ésta maneja flujos bidireccionales de energía, haciendo posible la generación distribuida y el autoconsumo. En [1] se analiza la generación distribuida con energías renovables. Estas características se logran principalmente con el desarrollo de dos grandes etapas: La gestión remota y la respuesta a la demanda. Es aquí en donde aparece el concepto de medidor inteligente, pues este dispositivo permite la gestión inteligente de la demanda.

El medidor inteligente tiene las siguientes características principales: comunicación bidireccional con la empresa generadora, capacidad de conectar y desconectar cargas, la capacidad de captar señales de corriente y tensión para su constante monitoreo. Los medidores inteligentes se encuentran desplazando gradualmente a los medidores tradicionales que aún se encuentran en operación. Adicionalmente en las nuevas redes que se van creando se prefiere instalar medidores inteligentes.

Una de las principales características de los medidores inteligentes es que poseen la capacidad de leer en tiempo real, aparte del consumo, las tasas de variación de los precios de la energía, permitiendo que los usuarios que implementen sistemas de respuesta a la demanda (DR por sus siglas en inglés). La capacidad de los medidores inteligentes para proveer información adicional en caso de apagones se analiza en [2]. Estas características son usadas por las empresas generadoras para conseguir una mayor eficiencia energética. Los sistemas de respuesta a la demanda logran disminuir



los picos de consumo, esto mediante la interacción del cliente con la empresa generadora. El cliente permite que un grupo de cargas de su hogar puedan ser manejadas por el medidor inteligente, que al captar la información del consumo y recibir de parte de la empresa otra información como el precio de la energía, toma decisiones para disminuir la demanda, es decir puede reprogramar el horario de funcionamiento de cargas programables o realizar una dimerización de cargas tipo HLAC (heating, lighting and air conditioning). Estos procesos logran mejorar la estabilidad de la red y benefician a la empresa generadora y al cliente económicamente [3].

Los métodos de respuesta a la demanda poseen desventajas, como la disminución del confort de los usuarios, por lo que se debe limitar el tiempo en el que los usuarios se vean expuestos a dicha pérdida de confort. Es requerida la aplicación de técnicas de control, monitoreo y automatización para el correcto gerenciamiento de la energía, haciendo con esto al sistema de respuesta a la demanda menos molesto para el cliente [4].

## **1.2. Descripción del Problema**

El rápido y constante desarrollo de la humanidad ha estado marcado desde siempre por el desarrollo de nuevas fuentes de energía. El descubrimiento de la energía eléctrica ha permitido un importante desarrollo en el que la gran mayoría de labores antes realizadas de manera manual, han sido reemplazadas por distintos tipos de máquinas controladas por alguna unidad de proceso. Esta constante incorporación de nuevas maquinarias hace necesario disponer de más fuentes de energía. Actualmente existen varias fuentes de energía eléctrica, entre ellas están la energía solar, eólica, nuclear, la obtenida en hidroeléctricas, siendo esta última la más importante en nuestra región. En los últimos años esta demanda se ha incrementado, debido a que industrias que utilizan formas de energía distinta a la eléctrica, como por ejemplo la industria automotriz que funciona en base a la combustión de un derivado del petróleo, han iniciado la producción de unidades híbridas, es decir capaces de usar el método tradicional de combustión y también pueden usar energía eléctrica almacenada en baterías, y además producen unidades netamente eléctricas.

La demanda de energía eléctrica conforme pasen los años continuará aumentando. Durante el transcurso de los últimos 70 años las empresas eléctricas se han desarrollado sobre tres pilares fundamentales que son: generación, transmisión y distribución [5]. De estos tres procesos los dos primeros han sido los más potenciados. Sin embargo, el sistema de distribución ha presentado una capacidad de control limitada debido a que el conocimiento de la demanda de energía de cualquier sector de consumo, sea residencial, comercial o industrial es limitado o en muchos casos nulo. Por lo tanto los prestadores del servicio eléctrico al no poseer esta información no están en la capacidad de realizar una correcta estimación de la demanda de consumo,



teniendo como única opción para garantizar la fiabilidad de la red, sobredimensionar la misma, produciéndose pérdidas energéticas y económicas. Es importante además que todos los usuarios tengan información más detallada de su consumo, que les asista en decisiones de ahorro energético.

Con el propósito de brindar herramientas que contribuyan al mejoramiento del sistema de distribución, para propósito de ahorro energético y manejo avanzado de energía, se han propuesto algunas soluciones tecnológicas, como por ejemplo la normalización del uso de focos ahorradores, sistemas domóticos y sistemas de medición inteligente. Como muestra de este último método se han desarrollado a nivel mundial varios programas, por ejemplo en Italia se han instalados 30 millones de dispositivos de medición inteligente en un período de 5 años (2000-2005), logrando así un ahorro de 500 millones de euros por año y una disminución del 5% del consumo de energía eléctrica [5].

Son notorios los grandes esfuerzos realizados con el fin de obtener un ahorro energético. Sin embargo, es notoria la necesidad de contar con sistemas que permitan tanto a las empresas generadoras de energía eléctrica como a los usuarios finales obtener información en tiempo real del consumo individual y colectivo. En base a estos datos se pretende que sea posible realizar un mejor manejo y planificación de la demanda eléctrica, esto para el lado de las empresas generadoras, y para el lado de los usuarios disponer de dispositivos inteligentes que realicen un gerenciamiento apropiado del consumo eléctrico en el transcurso del día sin afectar en mayor grado el confort de las personas, pero si logrando una disminución de dicho consumo y por lo tanto un ahorro económico.

La contribución de este trabajo consiste en realizar un prototipo de medidor inteligente con funciones de respuesta a la demanda, el prototipo se construyó en base a un circuito integrado dedicado a la medición del consumo eléctrico. El prototipo interactúa sobre una red de medidores inteligentes virtuales, las funciones de respuesta a la demanda son desarrolladas por medio de controladores difusos diseñados en MATLAB.

### **1.3. Estado del Arte**

Se observa sobre todo en países desarrollados que soluciones con redes inteligentes, medidores inteligentes y mecanismos de respuesta a la demanda se han implementado con resultados alentadores, sobre todo existe una moderada investigación sobre algoritmos de respuesta a la demanda que pueden ser implementados sobre una red inteligente.

Una investigación con resultados exitosos sobre la implementación de métodos de respuesta a la demanda se muestra en [6]. Entre los resultados y beneficios



encontrados se reporta un importante ahorro económico y con el hecho de reducir los picos de demanda evita la necesidad de contar con una mayor capacidad de generación. En [7] se muestra la implementación de un algoritmo que permite programar el horario de funcionamiento de determinadas cargas en base a la demanda limitada dentro de una micro-red. En [8] se muestra un mecanismo de respuesta a la demanda el cual invita a los usuarios a participar en los programas de respuesta a la demanda. En [9] se presenta una estrategia de respuesta a la demanda que permite desplazar el horario de uso de ciertas cargas basándose en una optimización heurística. El algoritmo propuesto permite que la curva final de consumo sea muy similar a la deseada, eliminando los picos de consumo. Los resultados de esta estrategia son positivos, mostrando una disminución entre el 5-10% de los costos operacionales y una reducción entre el 14-18% de la demanda en horarios pico de consumo. Métodos adicionales de respuesta a la demanda son analizados en [10]. Una detallada revisión de los principales beneficios de los programas de respuesta a la demanda se muestra en [4].

Una repuesta no coordinada por parte de los consumidores puede dar lugar a nuevos picos de consumo en otros horarios, por lo que se requiere de un algoritmo que sea capaz de producir una respuesta coordinada de todos los elementos de la red inteligente. En [11] y [12] se analizan algoritmos para resolver este problema.

En [13] se muestra a detalle las características que debe tener un medidor inteligente para su correcto diseño.

#### **1.4. Contribución de la Tesis**

El presente trabajo muestra la metodología y el diseño empleado para la construcción de un medidor inteligente para los hogares, este cumple con las siguientes características:

- Medir la potencia consumida por los usuarios.
- Soporta comandos de control sobre el mismo.
- Posibilita la utilización de métodos de respuesta a la demanda
- Está abierto a varios tipos de comunicación.

Un escenario AMI (*Advance Metering Infrastructure*) es simulado con el fin de probar la capacidad del medidor inteligente para dar respuesta a la demanda.

El sistema de monitoreo de energía (EMS), obtenido toma en cuenta los siguientes factores:



- Consumo de energía
- Fecha y hora
- Tipo de consumidor (prioridad alta o baja)
- Cargas tipo HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado) por sus siglas en inglés
- Cargas programables
- Precio de la electricidad

El método de respuesta a la demanda se desarrolló en base a un controlador difuso KBFC (knowledge base fuzzy controller), este es implementado tanto para las cargas HVAC como para las programables, en el caso de las primeras calcula el factor de dimerización, y para las cargas programables permite que desplazar el uso de estas fuera de los horarios pico.

El presente trabajo ha contribuido a la creación de artículo “*Design and implementation of a smart meter with demand response capabilities*” el mismo que ha sido enviado a “*Applied Energy Symposium and Forum, REM2016: Renewable Energy Integration with Mini/Microgrid*”



# CAPÍTULO 2

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. Redes Inteligentes

La transmisión y distribución eficiente de la energía eléctrica es un requisito fundamental para el desarrollo sostenible, confiable y de calidad del sistema eléctrico. En la actualidad, la infraestructura de la red eléctrica existente cumple parte de las expectativas (desde la generación tradicional y renovable hasta el transporte y parte de la distribución) pero tiene que mejorar notablemente desde el punto de vista del usuario final y las funcionalidades que se espera de ella.

La necesidad de modernizar las redes eléctricas está fundamentada en primer lugar en la integración de los recursos de generación sostenibles, especialmente las fuentes renovables, y en segundo lugar, por la creciente demanda de electricidad. Los picos de consumo suelen producirse en franjas horarias donde todos los consumidores acceden simultáneamente a sus electrodomésticos, aunque en general no sean conscientes de ello. La posibilidad de conocer en tiempo real el coste de la energía por parte del usuario final hace que pueda elegir cuándo utilizar determinados electrodomésticos repercutiendo en el coste final de sus facturas y a reducir los picos de consumo. Este último aspecto asocia el concepto de medidores inteligentes (Smart Meter) capaces de ofrecer una facturación detallada por franjas horarias permitiendo elegir las mejores tarifas y distinguir entre las horas de consumo, lo que permitiría un mejor uso de la red.

Dentro de este contexto, existen retos importantes, destacando la necesidad esencial de las innovaciones en esta área.

Por lo tanto, la visión futurística de las redes eléctricas apunta a un nuevo concepto, denominado *redes eléctricas inteligentes (Smart Grids)*. Aunque no existe una definición universal referente a una red inteligente, existen numerosas investigaciones y publicaciones realizadas en las cuales se presentan definiciones en función de las características y aplicaciones a desempeñar. Citaremos dos definiciones que engloban todo el concepto de las Smart Grids:

*“La red inteligente es básicamente un sistema de suministro de electricidad inteligente combinado con la tecnología digital y la información moderna, que proporciona eficiencia, seguridad, fiabilidad y más beneficios para empresas de servicios públicos y consumidores.”[5]*

*“Un Smart Grid es una red eléctrica que puede integrar de forma inteligente las acciones de todos los actores conectados a ella, generadores, consumidores y*





*aquellos que realizan ambas acciones, con el objetivo de proporcionar un suministro de electricidad seguro, económico y sostenible”. [14]*

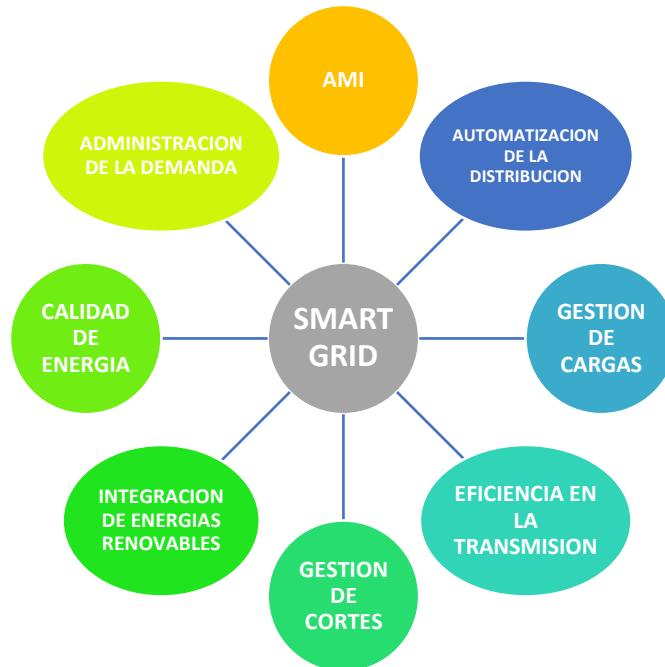
La visión de la red inteligente es modernizar el sistema de red existente para mejorar la eficiencia, la fiabilidad y la seguridad. Desarrollar y desplegar una red inteligente es costoso, sin embargo a largo plazo, una red inteligente será una buena opción para la sostenibilidad. De acuerdo con [15] los beneficios asociados con la red inteligente incluyen:

- Transmisión más eficiente de la electricidad
- Restablecimiento rápido de la electricidad después de perturbaciones eléctricas. Cuando hay una avería, las tecnologías de la red inteligente pueden detectar y aislar el problema y contribuir a que la recuperación de la electricidad sea rápida y se desarrolle estratégicamente
- Bajo costo de operación y mantenimiento de los servicios públicos
- Menor costo de la energía para los consumidores de electricidad
- Aumento de la integración de sistemas de energía renovable a gran escala
- Aumentan el nivel de fiabilidad y calidad en el suministro de energía eléctrica, devolviendo por ejemplo la electricidad a los servicios de emergencia en primer lugar. Además, pueden ayudar a prevenir muchas de las incidencias, evitando que lleguen a ocurrir.
- Facilitan a los clientes instrumentos que les permiten optimizar su propio consumo eléctrico y mejorar el funcionamiento del sistema global (gestión activa de la demanda). Las redes inteligentes dan al usuario la información y las herramientas necesarias para tomar decisiones sobre su uso de la energía.
- Contribuyen a mantener la sostenibilidad ambiental. Una red inteligente permite la máxima integración de la generación distribuida procedente de fuentes renovables y de instalaciones de almacenamiento de energía. Todo esto contribuyendo de manera extraordinaria a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Mejoran la eficiencia en la distribución de los flujos de energía y aportan la flexibilidad en la gestión de los picos de demanda, con la consiguiente disminución de las necesidades de nuevas instalaciones de generación y el aumento del aprovechamiento de las infraestructuras eléctricas actuales.

Una red inteligente apoya la integración segura y controlable de fuentes de energía renovables, y de nuevas categorías de usuarios de la red, como los vehículos eléctricos; la entrega de potencia de forma más segura y eficiente a través de la automatización de control avanzado y capacidades de auto-sanación después de un fallo y, por último, que los consumidores puedan estar mejor informados acerca de su demanda de electricidad y de participar activamente en el mercado de electricidad englobando el concepto de respuesta a la demanda sobre tarifas de precio dinámicas.



La Figura 2.1 muestra los servicios básicos integrados en un sistema de red inteligente [16].



**Figura 2.1 Servicios integrados en un sistema Smart Grid**

En general, una red inteligente agrupa varias etapas: un sistema de comunicación integrado, detección, medición, inteligencia y control. El sistema de detección y medición debe asegurar la interacción bidireccional entre el consumidor y la empresa. Además, proporciona tarifas en tiempo real de la electricidad, el consumo de electricidad, el costo de la electricidad, detección de interrupciones y precisión en caracterización de la carga. Esto es lo que comúnmente se conoce como AMI, infraestructura de medición avanzada, la cual está básicamente integrada por medidores inteligentes, monitoreo y controladores de carga. AMI incluye comunicaciones bidireccionales hasta el medidor, recogiendo, enviando, administrando y analizando los datos con mayor frecuencia, lo que permite conocer con mayor detalle cómo y cuándo se produce el consumo, lo que permite una gestión proactiva de clientes y recursos.

El sistema de comunicación integrado permite que el usuario y la empresa gestionen diferentes dispositivos inteligentes tales como los controladores de carga, medidores inteligentes, sensores de una manera segura y confiable. Los enlaces de comunicación de uso común son PLC (Power Line Communication), redes de banda ancha, Wi-fi, ZigBee, GPRS, 3G, y frecuencias de radio.

Por otro lado, una eficiente respuesta a la demanda se puede alcanzar a través de una red inteligente. El consumidor puede ajustar su consumo respondiendo a varias tarifas que aparecen en el medidor inteligente. También puede ajustar electrodomésticos



inteligentes para que respondan o actúen con respecto a los precios para minimizar los costos de electricidad. Por otro lado, la red inteligente promueve la generación de energía local, debido a su capacidad de medición de potencia en ambas direcciones, permitiendo toma de decisión en cuando un cliente se vuelve consumidor o generador.

## **2.2. Respuesta a la Demanda**

A lo largo de la historia el avance tecnológico ha conseguido simplificar mucho la vida de las personas, ya que con la invención de nuevos artefactos como electrodomésticos inteligentes, robots, entre otros, muchas tareas que tradicionalmente se han realizado manualmente, se las reemplaza con los mencionados artefactos. Sin embargo, además de los problemas éticos y sociales que conllevan estos adelantos científicos, la introducción de nuevos artefactos eléctricos implica un aumento en el consumo eléctrico. Por otra parte la constante disminución del petróleo en las reservas de cada país hace pensar cada vez en un cambio radical de las matrices energéticas de la mayoría de los países netamente petroleros como es el caso de Ecuador. Por ello son más comunes artefactos que no funcionen a base del petróleo, como por ejemplo los autos eléctricos, las cocinas eléctricas o de inducción, pero estos cambios al igual que los electrodomésticos inteligentes, robots y demás artefactos eléctricos que han aparecido en el transcurso de los últimos años, producen un considerable impacto en la demanda de energía eléctrica.

Debido a este constante aumento de la demanda de energía eléctrica, las empresas generadoras de energía han hecho frente al problema de un desbalance entre las curvas de oferta y demanda, es decir que al mantener el mismo método de generación se producirá que la curva de demanda sea mayor a la curva de oferta. La solución para hacer frente al mencionado problema es intentar balancear estas curvas aumentando la generación de energía conforme aumenta la demanda. Sin embargo, esta forma de hacer frente al problema no es el más efectivo, ya que si bien es cierto consigue abastecer a los usuarios en el instante requerido, pero no se lo puede considerar un solución definitiva debido a que las fuentes de generación son en muchos casos en base a recursos no renovables como los combustibles fósiles.

Los malos hábitos de consumo de energía en los hogares, son responsables de una considerable parte del incremento de las curvas de demanda. Las empresas generadoras de energía recurren con frecuencia a producir energía con el uso de recursos no renovables, esto hace que los precios de generación cambien conforme cambie el precio del combustible usado para dicho propósito, por esto es normal que en las horas del día en los cuales se presenten los picos de consumo, los precios de generación sean también los más elevados del día. Por tanto, en los países que manejan tarifas variables para los consumidores, el precio de la energía será más elevado en las horas pico de consumo produciendo así planillas eléctricas elevadas.



Los problemas analizados anteriormente en el lado del consumidor han dado lugar a que se compense el problema de la demanda excesiva intentando reducir la misma, es decir intentar controlar el desperdicio de energía. Además, se pretende reducir el consumo en el grado que sea posible en las denominadas horas pico, con esto se reducirán tanto los valores en las planillas como los precios altos de producción, es decir se obtiene una ganancia tanto en el lado del productor como en el lado del consumidor. Para esto se han desarrollado varios métodos y tecnologías, tales como las redes inteligentes analizadas en la sección 2.1, además se han desarrollado algoritmos que ayuden a controlar la demanda en el lado del consumidor, estos mecanismos son conocidos como métodos de respuesta a la demanda (“DR” por sus siglas en inglés).

Con la aparición de las redes inteligentes se consiguió un flujo bidireccional de información, entre la empresa eléctrica y el usuario. Las ventajas son diversas, por ejemplo es posible que los usuarios puedan conocer el estado en que se encuentran la oferta y demanda en cada instante requerido, pudiendo con esta información cambiar su forma de consumo.

El departamento de energía de los Estados Unidos define DR como *“El mecanismo de respuesta a la demanda se le puede considerar como un medio que proporciona a los usuarios la oportunidad de ser piezas clave dentro de una red eléctrica de modo que estos dinámicamente puedan reducir su consumo de energía en horas pico de demanda en respuesta a diferentes tipos de incentivos.* [17]

En [4] se define a DR como *“El cambio en la forma de consumo de los usuarios finales en relación a su manera habitual de consumo en respuesta a incrementos o decrementos de las tarifas de electricidad [...]”,* por lo tanto se puede decir que la implementación de mecanismos de respuesta a la demanda reportan en beneficios tanto para los usuario como para las empresas eléctricas. Los principales mecanismos para aplicar DR son la generación distribuida, asignación y gestión de cargas, entre otros. Medios que contribuyen a la reducción de la potencia suministrada por la red.

Los mecanismos de respuesta a la demanda ayudan además al equilibrio de la oferta y la demanda, en condiciones de alta demanda y baja producción. El principal efecto de los algoritmos de respuesta a la demanda es la reducción de los picos de demanda en las horas de alto consumo, desplazando el consumo a horas de baja demanda.

Un usuario que participe en un programa de respuesta a la demanda puede reducir su consumo de tres maneras:

- Reducir su consumo de energía por medio de estrategias de restricción de carga.
- Mover su consumo de energía a un diferente periodo de tiempo.
- Usar sus propias fuentes de generación de energía de modo que sean menos dependientes de la red eléctrica.



En este trabajo se desarrollan algoritmos de DR que a través de las lecturas de energía y tarifas en tiempo real, provenientes de un medidor inteligente, desplazan el consumo de cargas programables o en el caso de cargas HVAC, reducen el consumo de estas, permitiendo el funcionamiento de las cargas programables en horas de bajo consumo de energía.

### **2.3. El Medidor Inteligente**

Las compañías de electricidad a lo largo de los años han utilizado algunos tipos de medidores de consumo eléctrico, entre estos los más utilizados podemos citar a dos de ellos:

- Medidor de disco
- Medidor electrónico

#### **2.3.1. Medidor de Disco**

La Figura 2.2 muestra un medidor de disco. Este funciona por medio de inducción, está formado por un núcleo de material magnético, sobre el cual se instalan dos bobinas, la primera se instala en serie con el conductor principal (es decir la fase) de manera que posibilite el paso a través de éste de la corriente que circula hacia el hogar en donde está instalado el medidor. Esta bobina se la conoce como bobina de corriente. La segunda se la instala en derivación sobre los dos conductores, esta bobina se la denomina bobina de derivación o de tensión. Las dos bobinas producen flujos magnéticos desfasados entre sí  $90^{\circ}$  actuando sobre un disco giratorio, generalmente construido de aluminio. Los dos flujos producen pares de giros que permiten rotación del disco con una velocidad angular proporcional a la potencia consumida. Con el fin de evitar corrientes parásitas se suele frenar al disco con un imán instalado cerca del mismo, de esta manera el giro es siempre proporcional únicamente a la potencia consumida. El disco se conecta a un sistema mecánico de registro que provee la información final del consumo en Kilovatios/hora.



**Figura 2.2 Medidor Tradicional de Disco**

### **2.3.2. Medidor de Electrónico**

Los medidores electrónicos se caracterizan principalmente por la capacidad de medir el consumo por medio de tecnologías digitales. Estas tecnologías se caracterizan por digitalizar las señales de tensión y corriente de manera que puedan ser analizadas por elementos digitales como microprocesadores o circuitos integrados dedicados a este fin. Estas señales digitalizadas en muchos casos son aprovechadas de modo que los medidores electrónicos no brindan únicamente la información de energía consumida, sino otros valores como la frecuencia. Las fases de corriente y tensión, el factor de potencia, potencia aparente, entre otros. Estos medidores tienen también la capacidad de enviar los datos de consumo por medio de algún tipo de enlace de comunicación.

Las principales ventajas de los medidores electrónicos sobre los electromecánicos como el descrito anteriormente son por ejemplo, información en tiempo real, mayor precisión en la medida, mayor flexibilidad en el diseño de estos, además es importante destacar que sobre estos no actúan campos magnéticos que puedan alterar la medición de los datos. La Figura 2.3 muestra un medidor electrónico bifásico.



**Figura 2.3 Medidor Electrónico**

### **2.3.3. Medidor Inteligente**

Los medidores inteligentes se definen como una mejora de los medidores electrónicos, debido a que estos aparte de poseer las características de los electrónicos implementan nuevas funciones. La función principal es posibilitar una comunicación bidireccional, entre el usuario, a través de su medidor, y la empresa que presta el servicio eléctrico. Esta comunicación bidireccional hace posible la aparición de nuevos servicios como tener por ejemplo varios perfiles de consumo de acuerdo a las conveniencias de cada usuario y de la empresa, además se hace posible que la empresa eléctrica pueda conectar o desconectar el servicio de manera remota, así también facilita la detección de fugas de energía.

La Figura 2.4 muestra un diagrama de bloques de un sistema de medición inteligente. El sistema de medición consta de 5 bloques fundamentales: Adquisición de señales, acondicionamiento de señales, conversión analógica/digital, procesamiento y comunicación.

#### a) Adquisición de Señales

En el medidor inteligente se requiere realizar la medición tanto de la corriente como la del voltaje, es decir se necesitan dos tipos de traductores. Sin embargo, para estos transductores y en especial para el de corriente existen varios tipos sensores algunos de estos se analizan a continuación.

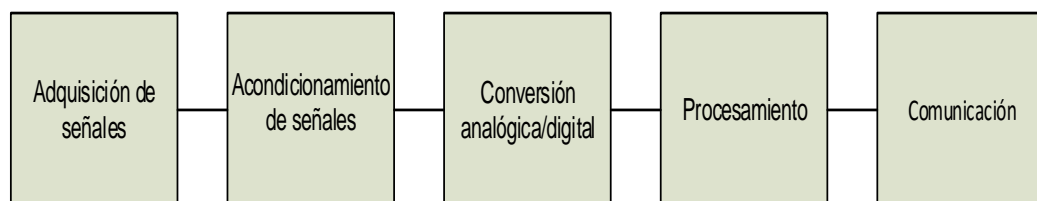
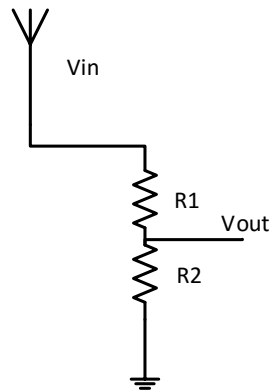


Figura 2.4 Diagrama de bloques de un medidor inteligente

#### b) Sensor de Voltaje

La Figura 2.5 muestra la configuración más frecuentemente encontrada en medidores de energía.



**Figura 2.5 Sensor de Voltaje**

Los valores de R1 y R2 se eligen de modo que la señal de voltaje entre en el rango permitido por el conversor ADC (*Analog to Digital Converter*). El valor de salida Vout está dado por (1)

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

En donde:

Vout es el voltaje de salida

Vin es el voltaje de entrada

Para este tipo de aplicación R1 y R2 suelen estar en la escala de K $\Omega$  para producir una baja disipación de potencia.

### **c) Sensor de Corriente**

Los sensores de corriente más comúnmente utilizados en medidores de energía son:

- Sensores basados en el efecto Hall
- Transformadores de corriente
- Resistencias Shunt
- Bobinas Rogowski

### **d) Sensores basados en el efecto Hall**

Este tipo de sensores generalmente se presentan en un encapsulado de CI (Circuito Integrado) funcionan al hacer pasar una corriente cerca del mismo, es decir no necesariamente la corriente a ser medida debe pasar por dentro del CI sino únicamente cerca, de manera que el campo magnético generado por esta pueda ser detectado por el sensor y mediante el efecto Hall proporciona un voltaje que es proporcional a la corriente medida.



### **e) Transformadores de corriente**

Este tipo de sensores constan de un transformador, este produce una corriente secundaria que es proporcional a la primaria, de este modo este tipo de sensores permiten aislar la señal enviada al ADC de la original, garantizando con esto una mayor exactitud en la medición de corriente.

### **f) Resistencias Shunt**

Este tipo de sensor se lo considera el menor costo en comparación con los demás métodos, únicamente consiste en un pequeño resistor, generalmente entre los valores de  $100\mu\Omega$ - $500m\Omega$  con el fin de disminuir la disipación en calor debido a que la potencia disipada es proporcional al cuadrado de la corriente que circula a través de esta, esta resistencia se la conecta en serie con la carga, produciendo un voltaje de salida proporcional a la corriente. Las principales ventajas de este sensor son su bajo costo, alta linealidad, inmunidad a interferencia magnética, su principal desventaja es el hecho de no presentar aislamiento.

### **g) Bobinas Rogowski**

Este tipo de sensores son bobinas con un núcleo no magnético, proporcionan un voltaje que es proporcional a la tasa de variación de la corriente, las principales características de estos sensores son, su gran precisión en la adquisición de datos, un amplio rango de medición de voltaje y frecuencia y un bajo costo de producción.

## **2.3.4. Unidad de Medición de Energía**

En el mercado existen varios CI dedicados a la medición de energía, generalmente estos incluyen unidades de acondicionamiento de señales y el módulo ADC. estos CI tienen una unidad de DSP (Procesamiento digital de Señales) permitiendo calcular otros parámetros importantes aparte del consumo, e.g. datos de potencia activa, reactiva y aparente, frecuencia, voltaje RMS, corriente RMS, temperatura, distorsión armónica total (THD).

### **a) Procesamiento**

A esta parte del medidor inteligente se le puede considerar como la más importante del mismo, debido a que esta parte generalmente implementada por medio de un procesador controla todas las funciones vitales del medidor, entre las más destacables tenemos las siguientes:

- Comunicación y control de la unidad de medición de energía
- Cálculos en base de los datos recibidos





- Muestra al usuario los datos eléctricos, tarifas y costos
- Detección de fugas
- Comunicación con otros dispositivos
- Manejo de potencia

### **b) Comunicación**

Los medidores inteligentes permiten la comunicación bidireccional de datos, para esto sin embargo es necesaria la implantación de un enlace entre las partes a ser comunicadas. Para esto se pueden emplear distintos tipos de enlaces, entre los principales se citan:

- Enlaces de fibra óptica
- Enlaces de cobre
- Enlaces inalámbricos
- Comunicación por la nube

El fabricante del medidor usará el tipo de enlace más adecuado para la zona en la cual se prestará el servicio.

## **2.4. Hardware en Lazo (HIL)**

El término HIL (Hardware in the Loop) es una técnica de simulación para desarrollo y validación que consiste en combinar modelos matemáticos, ejecutados en tiempo real por un ordenador con los componentes reales que se desea validar. El objetivo del HIL es proporcionar todos los estímulos eléctricos (simulación eléctrica de sensores y actuadores) para que el dispositivo bajo prueba funcione de igual manera como si estuviera conectado a un entorno real.

HIL simula el comportamiento de las entradas y salidas de un sistema físico que se conecta a una unidad de control normalmente embebida, se diferencia de otros tipos de simulación en que el sistema de control es real y genera señales que dependen de la respuesta del sistema físico de prueba. En otras palabras HIL es un dispositivo que engaña al sistema embebido de control haciéndole pensar que está operando con entradas y salidas del mundo real, en tiempo real.

En la Figura 2.6 se muestra el concepto envuelto en un sistema HIL. HIL facilita la capacidad de proporcionar estímulos al sistema para probarlo bajo una variedad de escenarios.



**Figura 2.6 Concepto envuelto en un sistema Hardware en Lazo (HIL)**

Las principales ventajas de un sistema HIL son:

- Validación del sistema en lazo cerrado.
- Posibilidad de automatización. El uso de modelos en lugar de una planta real permite la automatización de las pruebas.
- No se malgasta ni daña material.
- En muchos casos, utilizar un modelo de la planta resulta más económico y seguro que el uso de la planta real. Un ejemplo son las centralitas de control de motores de aviación.

# CAPÍTULO 3

## DISEÑO DEL MEDIDOR INTELIGENTE

### 3.1. Estructura de Hardware del Medidor Inteligente

Como ya se mencionó anteriormente, un medidor inteligente es diferente de los medidores convencionales porque posee características y funcionalidades adicionales a las que encontraríamos en un medidor tradicional. Aparte de proporcionar el consumo y mediciones eléctricas permite una doble comunicación entre el medidor y la empresa proveedora del servicio eléctrico. Además, esta característica de intercambio de información posibilita integrar numerosas funcionalidades dentro del medidor como varias tarifas, desconexión de cargas, prepago, facturación remota, desconexión y reconexión remota, detección de fugas, notificación de corte de energía, etc.

La Figura 3.1 muestra el diagrama de bloques que constituyen un medidor inteligente. Este incluye un bloque de adquisición y acondicionamiento de las señales de entrada, una conversión analógica – digital (ADC), procesamiento y comunicación.

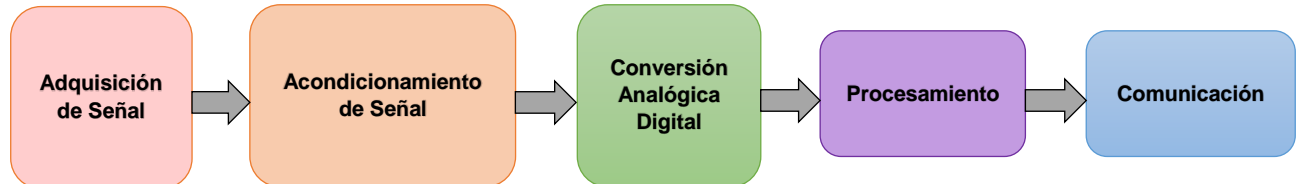


Figura 3.1 Diagrama de bloques del medidor inteligente

La adquisición de la señal se realiza mediante sensores de corriente y voltaje, habiendo varias opciones como se presentó en la sección 2.3.3. La elección de uno u otro dependerá del tipo de aplicación, costo, facilidad, precisión, etc. La etapa de acondicionamiento prepara las señales adquiridas a las condiciones establecidas por el módulo de conversión analógica digital. El procesamiento se realiza mediante un microcontrolador. Aunque existen microcontroladores de características de alto rendimiento que comúnmente realizan las dos tareas antes mencionadas. Sin embargo, en la actualidad existen numerosas variedades de circuitos integrados dedicados a calcular el consumo energético, integrando las etapas de conversión y procesamiento, entre los cuales podemos citar: *CS5490* de la empresa *Cirrus Logic*, *MCP3905* de *Microchip*, *ADE7753* de la empresa *Analog Devices*, etc. El desarrollo propuesto en esta tesis utiliza el *ADE7753*. Finalmente, un medidor inteligente debe poseer un puente de comunicación que le permita intercambiar información con la empresa proveedora del servicio. Los estándares de comunicación utilizados para

medidores inteligentes dependen de la arquitectura propuesta. Los principales estándares de comunicación utilizados son, entre otros GSM, WiMax, GPRS, etc.

Según [17] un medidor inteligente comúnmente consta de los siguientes componentes de hardware:

- Unidades de medición de corriente y voltaje.
- Fuente de alimentación.
- Unidad de medición de energía (IC)
- Microcontrolador
- Reloj de tiempo real
- Unidad de comunicación

La Figura 3.2 [14] muestra en detalle la estructura de un medidor inteligente.

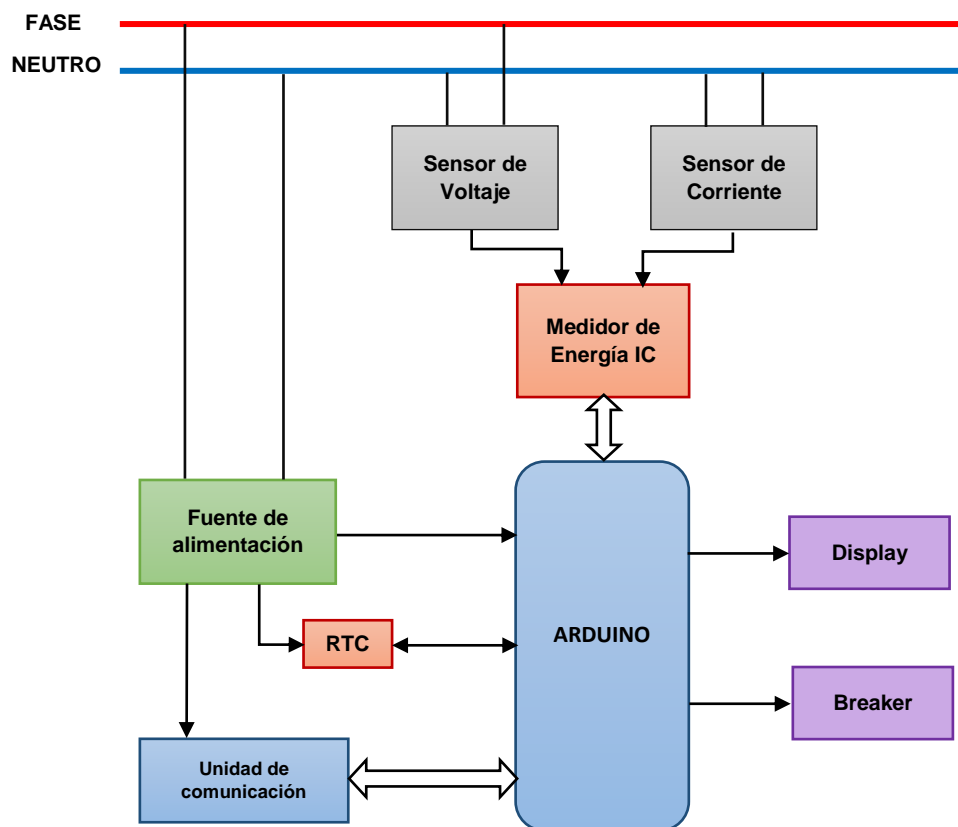


Figura 3.2 Estructura de un medidor inteligente

### 3.2. Adquisición y acondicionamiento de señales de entrada

El ADE7753 posee dos canales de entrada de voltaje totalmente diferenciales, etiquetados como V1P/V1N y V2P/V2N, que corresponden a las señales provenientes de los sensores de corriente y voltaje respectivamente. El máximo voltaje diferencial de cada canal de entrada, V1P/V1N y V2P/V2N, es de  $\pm 0.5V$ .

La Figura 3.3 muestra la arquitectura del hardware de medición de energía para ésta etapa de adquisición y acondicionamiento.

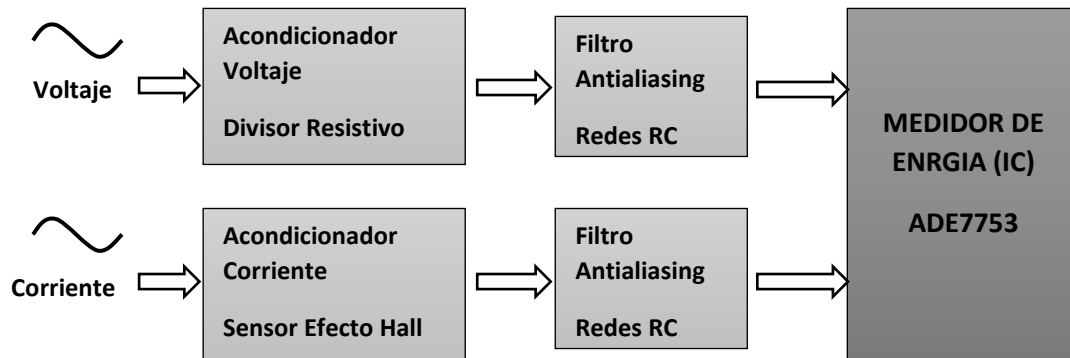


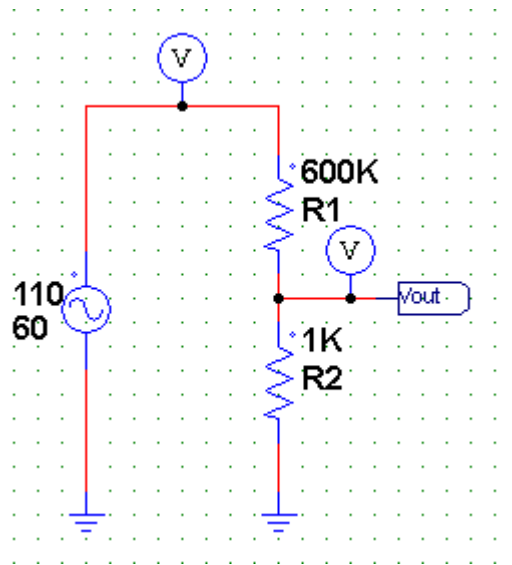
Figura 3.3 Arquitectura del hardware de medición de energía

Todas las entradas poseen filtros para evitar efectos de *aliasing* que ocasionen mediciones erróneas, y debido al voltaje máximo especificado anteriormente que tolera cada entrada es necesario adecuar las señales provenientes de los sensores, lo cual se detalla a continuación.

### 3.2.1. Unidad de medición de voltaje

El sensor de voltaje se lo realiza mediante un partidor de tensión. Los divisores de tensión son ampliamente usados como sensores de voltaje dentro de los medidores digitales, esto debido a su bajo costo, además de conservar la naturaleza de la señal.

La Figura 3.4 muestra la configuración de un divisor de voltaje como sensor. Los valores de  $R_1$  y  $R_2$  se escogen de tal manera que el voltaje AC de la línea sea atenuado hasta el rango de entrada de  $\pm 0.5V_{max}$  que permite el canal de entrada V2P/V2N del ADE7753.



**Figura 3.4 Sensor de Voltaje implementado**

El voltaje de salida del divisor se define por:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (3-1)$$

Donde,

$V_o$  es el voltaje de salida

$V_{in}$  es el voltaje de entrada

Normalmente  $R_1$  y  $R_2$  están en el orden de los  $K\Omega$  y  $R_1$  es mucho mayor que  $R_2$ . Generalmente se escogen resistores con valores grandes para obtener disipaciones de potencia pequeñas.

Los valores de  $R_1$  y  $R_2$  se escogieron siguiendo las especificaciones de la hoja de datos del ADE7753, la cual sugiere  $R_1 = 600K$  y  $R_2 = 1K$ . Dado que el voltaje rms de la línea es cerca de 110V, el valor rms a la salida sería: 183mV que es aproximadamente  $\pm 258mVp$ . Este valor está dentro del rango aceptable ( $\pm 0.5V$ ) por el ADE7753.

La Figura 3.5 muestra una prueba de simulación del sensor de voltaje implementado.

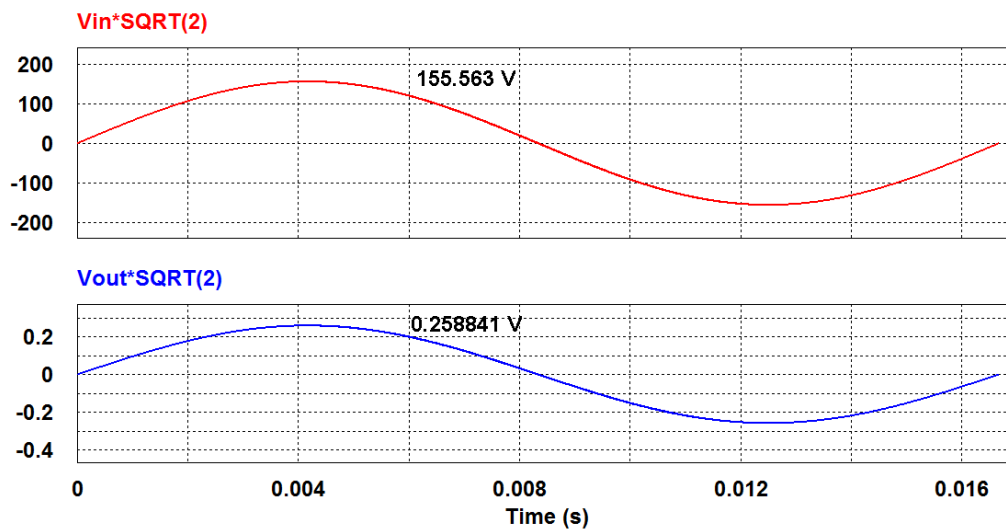


Figura 3.5 Simulación del funcionamiento del sensor de voltaje

### 3.2.2. Unidad de medición de corriente

En este desarrollo, se utiliza el sensor de corriente de circuito integrado FHS 40P/SP600, de efecto Hall, ampliamente utilizado en aplicaciones de medidores de energía, control de motores, protección contra altas corrientes, etc.

Este sensor (Figura 3.6) permite medir corrientes de hasta 100A sean de naturaleza AC, DC o pulsos. Una de las principales ventajas de este sensor es que proporciona un alto aislamiento (tipo galvánico) entre el circuito primario (potencia) y el circuito secundario (sensor), además de su bajo costo, no posee pérdidas de inserción, es de tamaño pequeño y posee excelente linealidad en su rango de medición. El integrado tiene incluido en su circuito la bobina o el inductor, encargado de captar el campo magnético generado por la corriente que circula cerca del mismo.

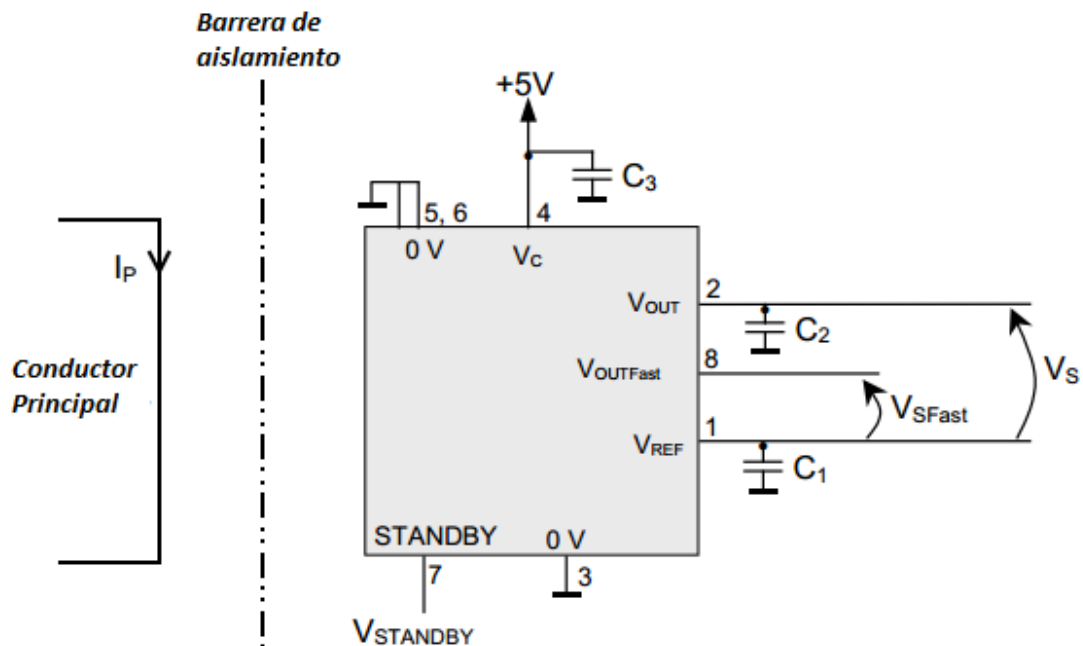
Algunos de sus datos técnicos son [18]:

- Voltaje de alimentación: 5V
- Consumo de corriente: 15mA
- Voltaje de salida:  $V_{ref} + V_{oe} + (G \times B)$
- Voltaje de referencia  $V_{ref}$ : 2.5V



Figura 3.6 Sensor de corriente

En la Figura 3.7 se muestra el esquema de conexión sugerido [18].



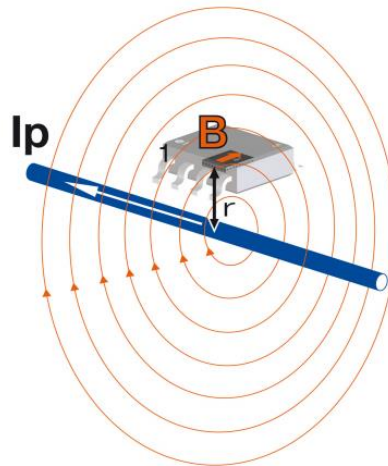
**Figura 3.7 Circuito recomendado para el sensor de corriente FHS 40P/SP600**

En donde  $C1=C3=47\text{nF}$ ,  $C2=4.7\text{nF}$ . El pin  $V_{\text{ref}}$  proporciona un voltaje de  $2.5\text{V}$ , el cual es usado internamente. También es posible introducir un voltaje en el rango  $1.5\text{-}2.8\text{V}$  en este pin. El voltaje  $V_s$  está limitado aproximadamente al valor de  $V_{\text{ref}}$  en ambas polaridades. Esto quiere decir que el voltaje máximo que se puede medir en  $V_{\text{out}}$  con respecto a GND, es de aproximadamente  $4.5\text{V}$  y  $2.5\text{V}$  con respecto a  $V_{\text{ref}}$ . Cuando se mide con respecto a tierra la señal de salida posee un offset de  $2.5\text{V}$ .

La corriente que se logre medir por el sensor antes de que se sature dependerá de la sensibilidad ( $\text{mV/A}$ ) del mismo. La hoja de especificaciones proporciona varias configuraciones para alcanzar varios rangos de medición de corriente.

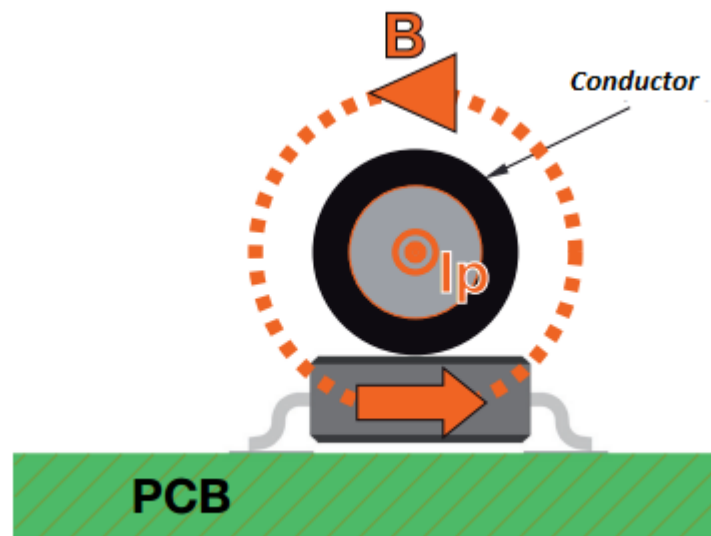
Algo importante a considerar es el sentido de la corriente, ya que esto puede ocasionar, en el caso de corriente AC, un desfase de  $180^\circ$ . Debido a esto, la hoja de especificaciones especifica el sentido en el que debe circular la corriente a medir, como se muestra en la Figura 3.8.





**Figura 3.8 Sentido de circulación de la corriente en el sensor**

De las varias configuraciones sugeridas en la hoja de especificaciones y las pruebas realizadas con el sensor, se optó que la corriente circule a través de un conductor que se ubica sobre el integrado, como se observa en la Figura 3.9. Esta configuración permite medir corrientes superiores a 50A, además de que permite variar la sensibilidad del sensor con solo acercar o alejar el conductor.



**Figura 3.9 Conductor ubicado sobre el sensor de corriente**

La señal de voltaje que el sensor ofrece a su salida depende de la corriente y de la sensibilidad calibrada en el sensor. El voltaje máximo que es capaz de generar el sensor a su salida con respecto a  $V_{ref}$ , es de 2V, este valor debe ser atenuado al valor máximo tolerado por el ADE7753, es decir los 500mV máximo. Por tanto, se implementa un divisor de tensión encargado de atenuar el voltaje a la entrada del ADE7753.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{out\ Sensor} \quad (3-2)$$

Donde  $R_1=1K\Omega$  y  $R_2=330\Omega$ .

$$V_{out} = \frac{330}{1000 + 330} 2V$$

$$V_{out} = 0.496V$$

Este valor está dentro del rango aceptable por el ADE7753.

Además, como se mencionó anteriormente la señal de salida medida con respecto a tierra posee un offset de 2.5V. Para solucionar esto se colocó un capacitor electrolítico de 100uF, con el cual se consigue un desfase menor a un grado respecto a la señal original. Este valor se seleccionó experimentalmente.

La Figura 3.10 muestra tanto el proceso para la eliminación del offset originado en el sensor de corriente como el divisor de tensión aplicado para acoplar la señal a los niveles recomendados para la unidad de medición el ADE7753. (Ver sección 3.3). La Figura 3.11 muestra los resultados de la simulación del arreglo anterior.

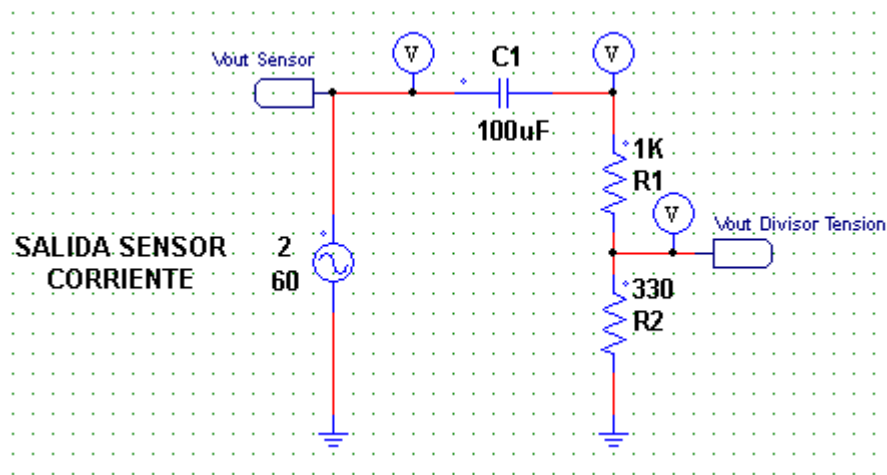


Figura 3.10 Acondicionamiento de la señal de salida del sensor de corriente

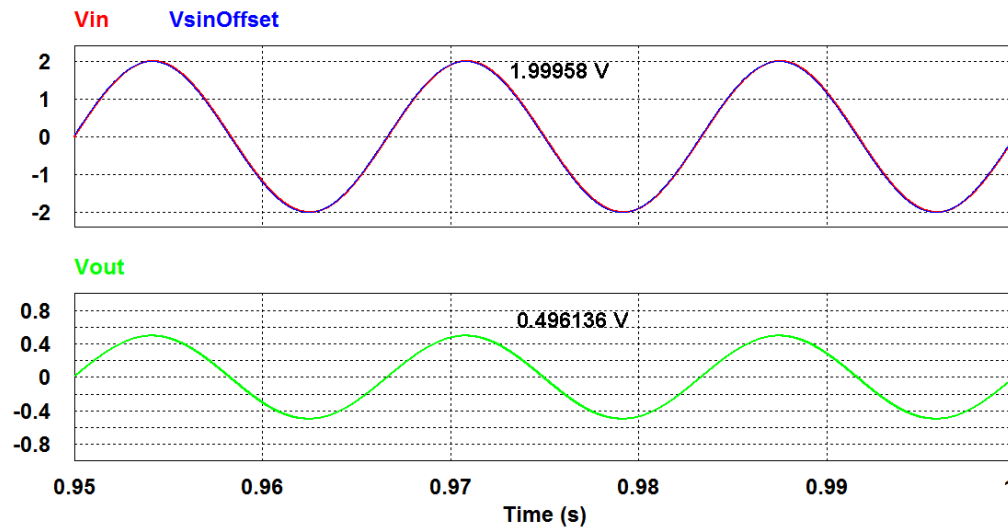


Figura 3.11 Simulación del circuito de acondicionamiento

### 3.2.3. Filtro Antialiasing

En secciones anteriores se mostró el proceso seguido para acondicionar las señales de voltaje y corriente a los niveles que acepta el medidor de energía. Sin embargo, en sistemas de adquisición de datos existe un fenómeno que se debe considerar, el denominado *aliasing*. Este efecto no deseado se produce cuando la señal de entrada contiene componentes de frecuencia mayores a la mitad de la frecuencia de muestreo del ADC, ocasionando un muestreo erróneo de las señales, reflejándose en cambios de frecuencia y fase de la señal muestreada.

Para evitar el aliasing, la hoja de especificaciones del ADE7753 [19], sugiere colocar un filtro RC antialiasing en cada canal de entrada. De acuerdo con el teorema de Nyquist, éste filtro debe tener una frecuencia de corte igual a la mitad de la frecuencia de muestreo. Esta frecuencia también dependerá del conocimiento que se tenga de las señales de entrada y del tratamiento que se le quiera dar. Para nuestro trabajo, las señales de entrada poseen una frecuencia fundamental de 60Hz, frecuencia de la línea eléctrica, sin embargo, si se deseara realizar un análisis de armónicos, deberían considerarse frecuencias mayores.

El ADE7753 incorpora dos ADC de 16 bits que trabajan a una frecuencia de muestreo igual a  $CLKIN/4$ , es decir  $3.5796MHz/4 = 894KHz$ . Por tanto, el filtro RC debe tener una frecuencia de corte máxima en 447KHz.

La frecuencia de corte de un filtro RC pasa bajos de primer orden está dada por la siguiente ecuación:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3-3)$$

Y en [22] se sugiere colocar los valores de  $R=1K\Omega$  y  $C=33nF$ . En éste trabajo se ha seguido tal recomendación. De la ecuación anterior se desprende que:

$$f_c = \frac{1}{2\pi(1000)(33E-9)}$$

$$f_c = 4.8KHz$$

La Figura 3.12 muestra el esquema del filtro mencionado. La respuesta en frecuencia (diagrama de Bode) del filtro se muestra en la Figura 3.13.

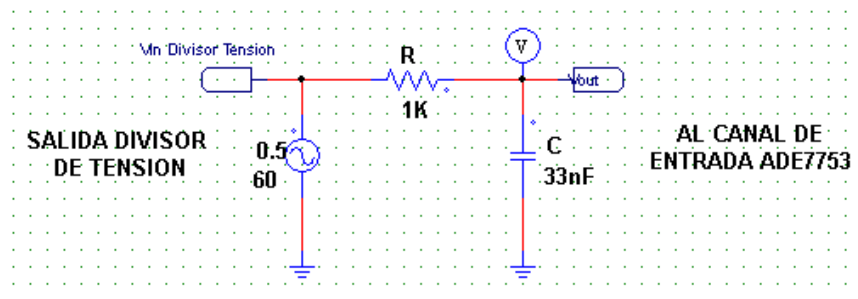


Figura 3.12 Esquema del filtro antialiasing

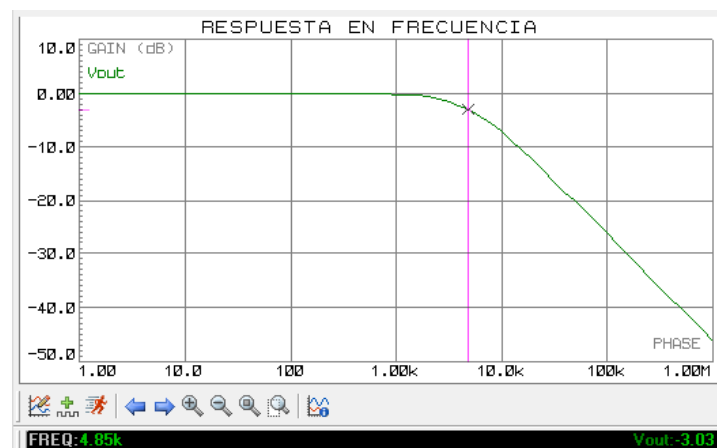


Figura 3.13 Respuesta en frecuencia del filtro

### 3.3. ADE7753

Una vez realizados los procesos de adquisición y acondicionamiento de las señales provenientes de los transductores de voltaje y de corriente, se debe realizar el cálculo de los parámetros eléctricos de interés en base a los datos provenientes de los sensores. Para esto se utiliza un circuito integrado (CI) dedicado, el ADE7753. La hoja característica del fabricante especifica que las variables que puede medir el ADE7753 son:

- Potencia activa, reactiva y aparente
- Periodo de la señal proveniente del sensor de voltaje
- Voltaje rms y corriente rms

El ADE7753 posee además una interfaz serial que permite la comunicación del CI con la unidad que lo controle, además de una salida (ZX) que produce un pulso cada vez que se detecte un cruce por cero en la entrada del sensor de voltaje.

El CI trabaja almacenando los datos que calcula en varios registros, los mismos que son accedidos por la interfaz serial antes mencionada. El ADE7753 está disponible en un encapsulado 20-lead SSOP. La Figura 3.14 muestra el diagrama de bloques funcional emitido por el fabricante [19].

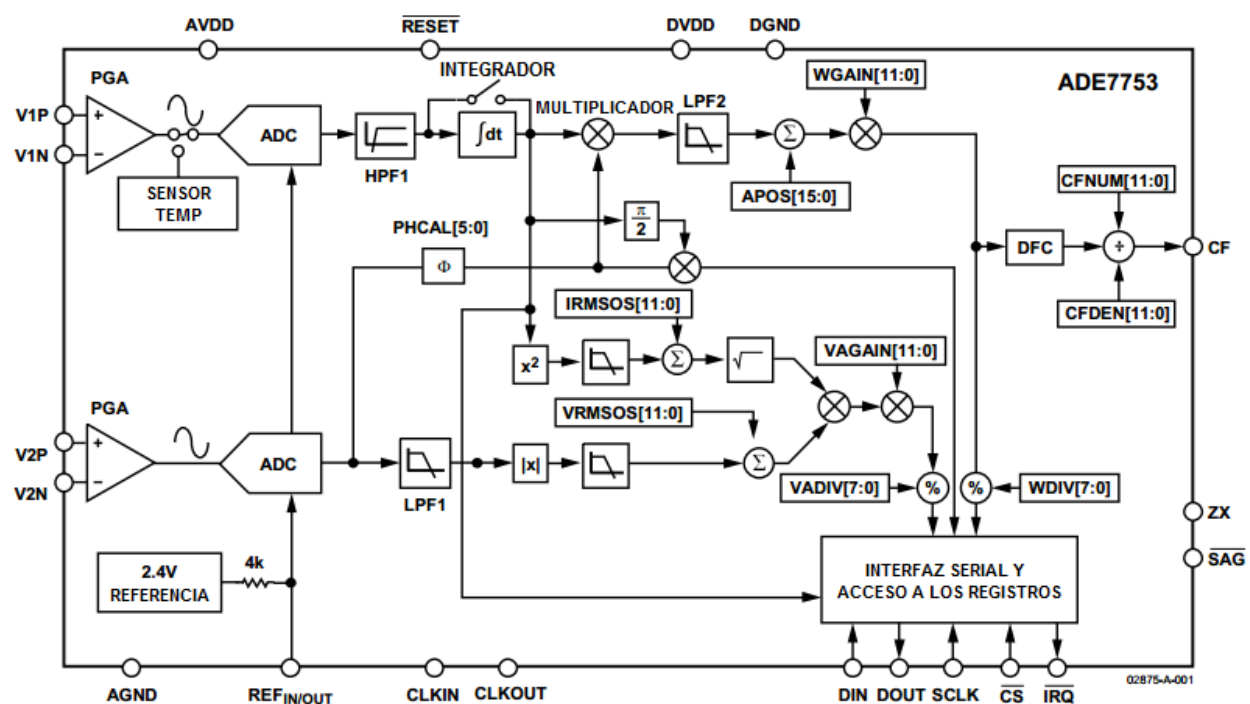


Figura 3.14 Diagrama de bloques funcional del ADE7753

La Figura 3.15 muestra el PCB final del circuito del medidor inteligente en base al ADE7753.



**Figura 3.15 PCB del medidor de consumo energético basado en el ADE7753**

A continuación se muestra el proceso que el CI usa para el cálculo de la potencia activa, voltaje RMS y corriente RMS según la hoja característica provista por el fabricante.

### 3.3.1. Cálculo de la potencia activa

La potencia en sistemas eléctricos se define como la tasa de energía que fluye desde una fuente a una carga. El producto entre las formas de onda de corriente y voltaje produce la potencia instantánea, siendo ésta la tasa de energía que fluye en cada instante de tiempo, su unidad son los vatios [W].

Se define la potencia instantánea  $p(t)$  como:

$$\begin{aligned} p(t) &= v(t) i(t) \\ p(t) &= VI - VI \cos(2\omega t) \end{aligned} \quad (3-4)$$

En donde:

$$v(t) = \sqrt{2} V_{sen}(\omega t) \quad (3-5)$$

$$i(t) = \sqrt{2} I_{sen}(\omega t) \quad (3-6)$$

La potencia activa o real se la puede calcular integrando la potencia instantánea entre un determinado número de periodos  $n$ .

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} p(t) dt = VI \quad (3-7)$$

En (3-7) vemos que la potencia activa corresponde a la componente en DC de (3-4). Ésta relación es la que usa el ADE7753 para el cálculo de la potencia activa; toma las señales provenientes de los sensores de corriente y voltaje, y realiza una multiplicación de estos, de la señal de potencia instantánea resultante se extrae el componente de DC por medio de un filtro pasa bajas (LPF) guardando este valor en el registro donde almacena la información de la potencia activa.

### 3.3.2. Cálculo de la potencia reactiva

La potencia reactiva se la define como el producto entre las señales de voltaje y corriente en donde uno de ellos se encuentra desfase con respecto al otro  $90^\circ$ . La señal resultante del producto mencionado da como resultado la potencia reactiva instantánea. Si consideramos el caso en que la señal de corriente se encuentra desfasada  $+90^\circ$  tenemos la siguiente expresión para la potencia aparente instantánea:

$$Rp(t) = v(t) * i'(t)$$

$$Rp(t) = VIsen(\theta) - VIsen(2wt + \theta) \quad (3-8)$$

Donde:

$\theta$  es el ángulo de fase entre las señales de voltaje y corriente.

$V, I$  son los valores rms de voltaje y corriente respectivamente.

Al integrar el valor de la potencia reactiva en un determinado tiempo obtenemos el valor de la potencia reactiva  $RP$ :

$$RP = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} Rp(t)dt = VIsen(\theta) \quad (3-9)$$

Al igual que en el caso de la potencia activa, la potencia reactiva es igual a la componente en dc del valor mostrado en (3-8) correspondiente a la potencia reactiva instantánea. El ADE7753 por lo tanto genera la señal de la potencia reactiva instantánea al multiplicar la señal de voltaje por la de corriente. Ésta última es primero desfasada  $+90^\circ$ , la componente de DC es extraída mediante un LPF. La Figura 3.16 muestra el proceso usado por el CI para obtener el valor de la potencia reactiva mostrado en las hojas características del mismo.

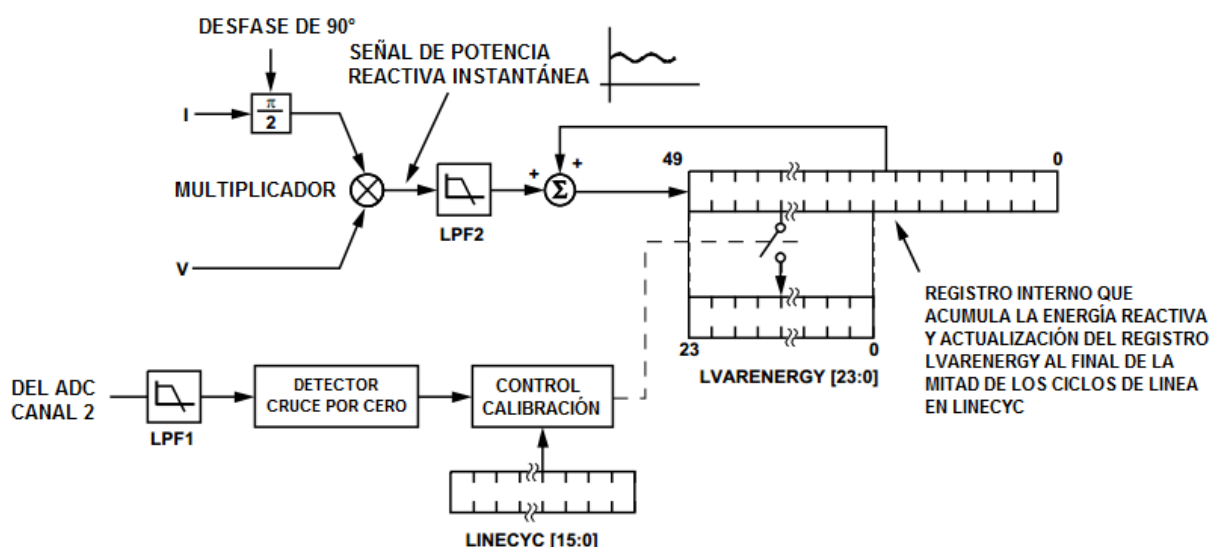


Figura 3.16 Proceso para el cálculo de la potencia reactiva



### 3.3.3. Interfaz de comunicación serial

Los datos calculados en el ADE7753 son almacenados en registros, estos son accesibles a través de la interfaz de comunicación serial SPI propia del CI. Luego de alimentar el circuito y verificar que el pin RESET se encuentre en estado bajo, el CI se pone en modo de comunicación, este estado del CI indica que el chip se encuentra a la espera de recibir instrucciones en su registro de comunicaciones.

Los registros del ADE7753 no únicamente almacenan los valores de los parámetros calculados, sino también permiten la configuración del CI, esto al escribir sobre los registros determinados para este fin. El procedimiento para realizar una operación de lectura o escritura en los registros del ADE7753 es el siguiente:

1. Activar el modo de comunicación del ADE7753.
2. Primero se realiza una operación de escritura sobre el registro de comunicación, este es un registro de 8 bits, el bit más significativo MSB indica que tipo de operación será la siguiente, 1 para escritura y 0 para lectura, el siguiente bit se lo debe siempre mantener en 0, los 6 bits restantes indican la dirección del registro sobre el cual se realizará la siguiente operación.
3. Realizar la operación de lectura o escritura según se haya especificado en el registro de comunicación.

El ADE7753 dispone de estos cuatro pines necesarios para realizar la comunicación SPI, DIN, DOUT, SCLK y  $\overline{CS}$ .

Los dos primeros corresponden al ingreso y salida de los bits que contienen la información, SCLK corresponde a la señal de reloj que proviene del dispositivo que controle el CI. En este trabajo se utiliza un Arduino Mega 2560 como unidad de control, éste envía una señal de reloj y además controla la señal que ingresa en el  $\overline{CS}$  cuya función es seleccionar el chip que se comunicará con el Arduino Mega.

### 3.3.4. Operación de escritura y lectura en los registros del ADE7753

La secuencia que sigue el proceso de escritura comienza con escribir en el registro de comunicaciones los primeros 8 bits de control, el MSB debe ser 1, seguido de un cero y la dirección del registro al cual deseamos acceder con el fin de escribir sobre él. La información es escrita un bit a la vez, en cada flanco de bajada de la señal de reloj se desplaza un bit hasta que toda la palabra sea escrita en el registro.

Los registros que permiten la operación de escritura pueden ser de distinta capacidad, 8 bits como el registro de comunicación, hasta 16 bits como el registro de estado.

La Figura 3.17 muestra el proceso de escritura descrito [22].



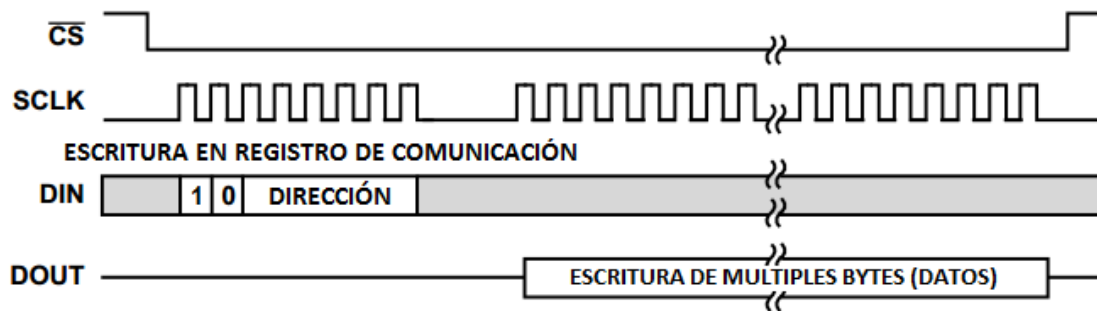


Figura 3.17 Operación de Escritura

La operación de escritura se realiza de manera similar a la anterior, el proceso empieza con una operación de escritura sobre el registro de comunicación, teniendo antes al CI en modo de comunicación, para la operación de lectura el MSB del byte escrito en el registro de comunicación debe ser cero, el siguiente bit se mantiene igual que antes en el mismo valor de cero, los seis bits restantes indican la dirección del registro al cual se requiere acceder. La información extraída de los registros en una operación de lectura se desplaza bit a bit hacia el pin DOUT en cada uno de los flancos de subida de la señal de reloj. La Figura 3.18 muestra el proceso de lectura tomado de las hojas características del CI.

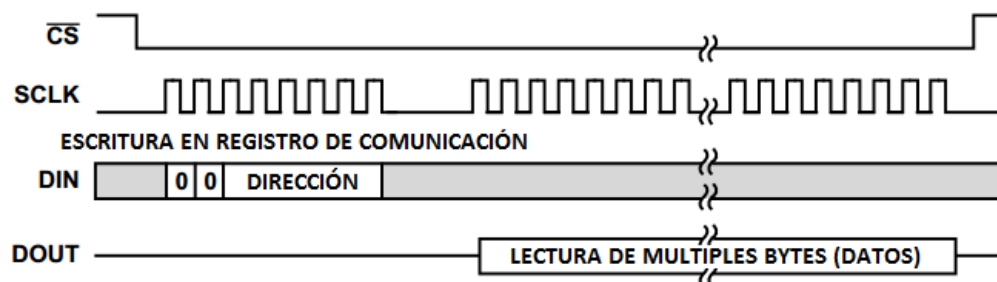


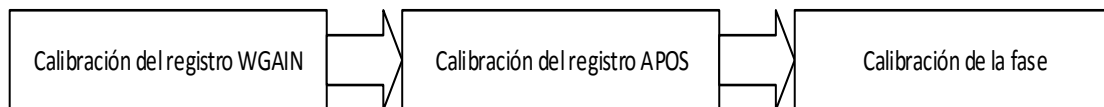
Figura 3.18 Operación de Lectura

### 3.3.5. Calibración del ADE7753

El ADE7753 permite calibrar el dispositivo de manera que podamos obtener datos exactos de los parámetros medidos. Para esto es posible realizarlo de dos maneras, la primera es utilizar otro ADE7753 ya calibrado y la segunda es mediante el uso de señales conocidas, las cuales son introducidas en las entradas analógicas donde normalmente se conectan los sensores de voltaje y corriente de modo que conozcamos previamente el valor que el CI debe emitir en sus registros.

El primer método consiste en sincronizar la salida CF del ADE7753 de referencia, esta salida CF (por sus siglas en inglés Counter Frequency) se caracteriza por proporcionar un pulso cada vez que el valor del registro que almacena la potencia consumida es actualizado.

El segundo método consiste en calibrar el CI en base a valores conocidos para las entradas de los sensores de corriente y voltaje, este método consiste en calcular un valor deseado de frecuencia en los pulsos emitidos en CF. Este valor se calcula en base al periodo de la línea medido por el CI y almacenado en el registro PERIOD y al número de ciclos de media onda almacenados en el registro LINECYC. La Figura 3.19 muestra el proceso de calibración previo a la medición de la potencia activa.



**Figura 3.19 Calibración para la medición de la potencia activa**

El ADE7753 también permite calibrar errores de “offset” producidos en los registros de corriente y voltaje RMS y los registros necesarios para la medición de potencia aparente.

### **3.3.6. Calibración de Potencia y fase (WGAİN y APOS)**

El método utilizado para la calibración del ADE7753 es el realizado por el segundo de los expuestos anteriormente. Para obtener las señales conocidas que reemplacen a las que normalmente provienen de los sensores, se usa un generador de funciones, el diseño de la entrada analógica que se conecta al divisor de tensión que funciona como sensor de voltaje tiene la particularidad de que por medio del cambio de posición de un “jumper” sea posible elegir entre conectar la línea de alimentación de la casa o una señal de prueba como la proveniente del generador de funciones, esta última no pasa a través del divisor de tensión sino es conectada directamente a las entrada analógica 2 del ADE7753 (pin 7), la entrada del sensor de corriente se la conecta directamente.

Para iniciar la calibración se requieren conocer ciertos parámetros que son constantes en todo el proceso, los mismos que se citan a continuación:

1. Constante del medidor [imp/KWh]. Indica el número de impulsos que se producirán en la salida CF del ADE7753. El valor recomendado por el fabricante es de 3.2 imp/KWh.
2. Corriente base. Se refiere al valor de la corriente con la cual se realiza la calibración del CI, el valor escogido es de 1 A.
3. Corriente Máxima. Indica el valor máximo de corriente que medirá el CI ADE7753, el valor utilizado es de 30 A.
4. Voltaje de línea. Indica el voltaje que alimenta las cargas. El valor usado es de 120 V.
5. Frecuencia de línea. Indica la frecuencia a la cual trabaja la red eléctrica, este valor junto con el anterior son los valores típicos usados en los hogares de Ecuador. El valor de la frecuencia es 60Hz.
6. El registro CFNUM debe ser establecido en (0x00)



El valor  $CF_{esperado}$  se calcula según la siguiente ecuación provista por los fabricantes:

$$CF_{esperado} = \frac{\text{Constante del medidor} \left( \frac{imp}{Wh} \right) \text{Carga}(W)}{3600^S/h} \cos \varphi \quad (3-10)$$

En donde el valor de  $\cos \varphi$  corresponde al factor de potencia, debido a que en este caso no tenemos ningún desfase entre las señales de corriente y voltaje, asumimos un factor de potencia igual a uno.

Con estos valores de prueba se procede a calcular el valor de LAENERGY esperado para dichos niveles, este se calcula con la siguiente ecuación:

$$LAENERGY_{IB(esperado)} = INT \left( \frac{CF_{IB(esperado)} \frac{LINECYC_{IB}}{2} PERIOD \ 8/CLKIN}{\frac{CFNUM + 1}{CFDEM + 1} WDIV} \right) \quad (3-11)$$

Para calcular la ecuación (3-11) debemos tomar en cuenta lo siguiente:

$CF_{IB(esperado)}$  se calcula por medio de la ecuación (3-10).

$LINECYC_{IB}$  muestra el tiempo en el que el ADE7753 realiza las mediciones, el fabricante recomienda establecer el valor de este registro en 2000, de modo que el tiempo que el CI realizará las mediciones es de:

$$tiempo = \frac{2000}{120} = 16.666 \text{ seg}$$

PERIOD es el registro en el cual se almacena el dato del periodo de la señal, se lo obtiene al leer dicho registro una vez transcurridos los 16.666 seg que dura la prueba.

CLKIN se refiere a la frecuencia a la cual trabaja el ADE7753, esta frecuencia está dada por el cristal conectado al mismo, teniendo un valor de  $3.579545 \times 10^6$  Hz.

Las hojas características del CI recomiendan que el valor de CFNUM sea de (0x00) para la correcta calibración del mismo, mientras que el valor de CFDEN se obtiene de la siguiente formula:

$$CFDEN = INT \left( \frac{CF_{IB(nominal)}}{CF_{IB(esperado)}} \right) - 1 \quad (3-12)$$

El valor de  $CF_{IB(nominal)}$  para los valores de  $I$ ,  $I_{MAX}$  descritos anteriormente se calcula así:

$$CF_{IB(nominal)} = 23KHz * \frac{1}{4} * \frac{1 A}{30 A} = 191.66$$

WDIV generalmente toma el valor de 1.



Al reemplazar los datos establecidos anteriormente en la ecuación (3-10) obtenemos el valor de  $CF_{IB(esperado)}$  así:

$$CF_{IB(esperado)} = \frac{3.2 \left( \frac{imp}{Wh} \right) * 120(V) * 1A}{3600 \frac{s}{h}} * 1 = 0.106 \text{ Hz}$$

Con este valor y el de  $CF_{IB(nominal)}$  encontrado anteriormente podemos reemplazarlos en la ecuación (3-12) quedando:

$$CFDEN = INT \left( \frac{191.666 \text{ Hz}}{0.106 \text{ Hz}} \right) - 1 = 1796$$

Con pruebas realizadas el valor del registro PERIOD obtenido es de 0x1E00, que expresado en sistema decimal tenemos 7680 unidades de tiempo (ut).

Estos datos reemplazados en (3-11) nos da el valor de  $LAENERGY_{IB(esperado)}$ .

$$LAENERGY_{IB(esperado)} = INT \left( \frac{0.106 \text{ Hz} * \frac{2000}{2} * 7680 \text{ ut} * 8 / 3.579545 \times 10^6 \text{ Hz.}}{\frac{1}{1797}} \right)$$
$$= 3269.46$$

El valor que se debe escribir en el registro WGAIN que es el encargado de realizar la compensación en la medición de la potencia activa se calcula con:

$$WGAIN = INT \left( \left( \frac{LAENERGY_{IB(esperado)}}{LAENERGY_{IB(nominal)}} - 1 \right) * 2^{12} \right) \quad (3-13)$$

En la ecuación (3-13) reemplazamos el valor medido en el registro LAENERGY y el valor esperado del mismo, que lo calculamos con (3-11) obteniendo que el valor a escribir en el registro WGAIN es 0x0060.

Finalmente se realiza una nueva medición de la potencia activa y se compara el valor medido con el valor deseado. El valor medido fue:

$$LAENERGY_{IB(medido)} = 0x0C9F$$

$$LAENERGY_{IB(esperado)} = 0x0CC5$$

Debido a que el registro LAENERGY es de 24 bits el error entre los el valor medido con el esperado es despreciable, culminando con esto el proceso de calibración del ADE7753, sin ser necesario continuar con el resto de parámetros pues el CI funciona de manera correcta.

### 3.4. Unidad de procesamiento

El prototipo de medidor inteligente posee una unidad de procesamiento basada en la tecnología Arduino. El Arduino Mega se ha seleccionado por su facilidad de programación y la disponibilidad de interfaces a través de sus puertos. Este es considerado el núcleo del medidor inteligente y gestiona las siguientes funciones:

- Comunicación con el medidor de energía.
- Comunicación con el sistema de gerenciamiento de energía SGE.
- Cálculos basados en los datos recibidos.
- Visualización de parámetros eléctricos.
- Control de cargas.
- Comunicación con otros dispositivos.

La Figura 3.20 muestra las partes del medidor inteligente.

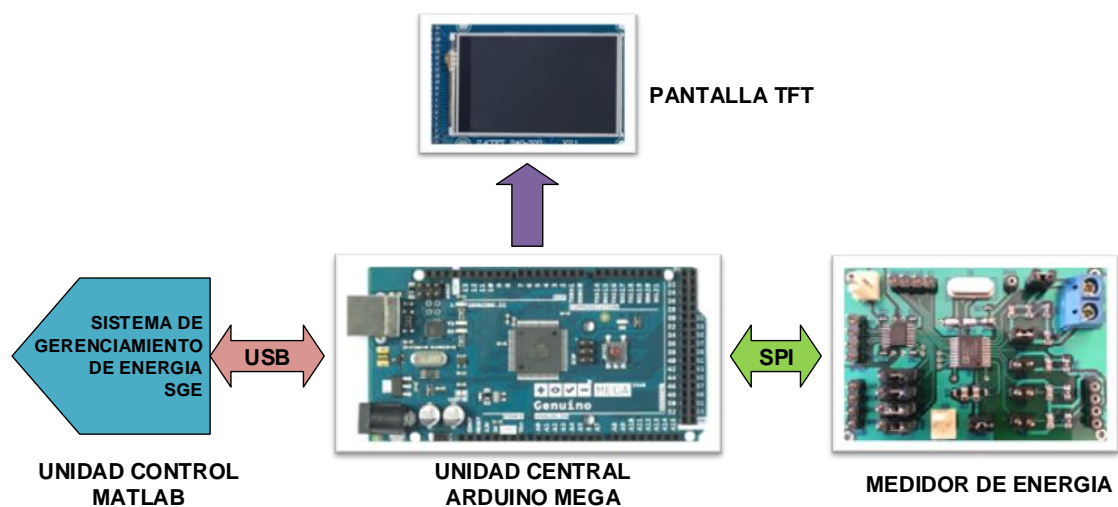


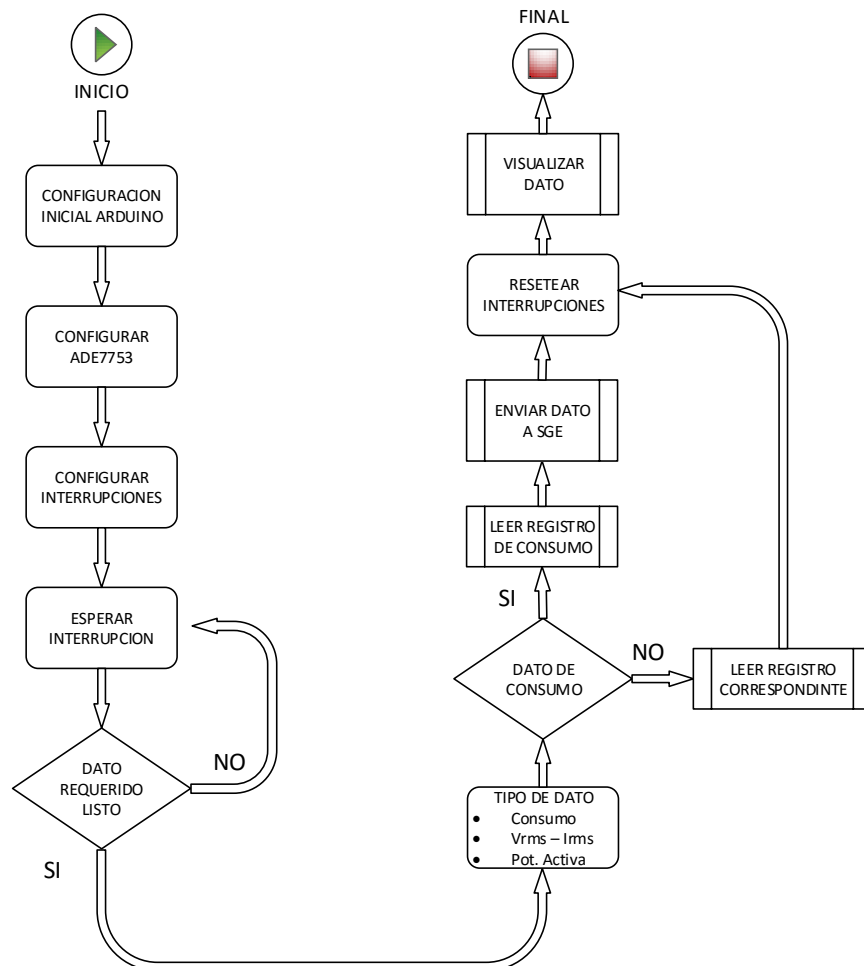
Figura 3.20 Estructura de Hardware del medidor inteligente

La comunicación con el medidor de energía la realiza a través de una interfaz SPI, mientras que con el sistema de gerenciamiento de energía, SGE, a través del puerto serial conectado a la PC. Con el objetivo de obtener la información calculada por el medidor de energía (consumo, potencia activa, voltaje rms, corriente rms, periodo) y procesarla, el módulo Arduino ejecuta comandos de envío y petición de información. En [22] se mencionan varios de los parámetros eléctricos que es capaz de calcular el CI ADE7753 y la manera de acceder a los mismos.

Los medidores inteligentes normalmente están diseñados con pantallas LCD, en los que se visualiza el consumo y las tarifas actualizadas. Además, algunos proporcionan señales alarma con el objetivo de informar al consumidor de altas tarifas y demanda de energía. En este caso se ha optado por dotar al prototipo de medidor inteligente de una pantalla TFT para cumplir con la función de visualización antes mencionada.

Muchos medidores inteligentes envían señales de control encargadas de regular la intensidad, programar y controlar el encendido-apagado de diferentes tipos de carga. En el presente proyecto, la unidad central (módulo Arduino) es la encargada de enviar las señales antes mencionadas, pero es la unidad de control, representada por el algoritmo de lógica difusa implementado en MATLAB, la encargada de generar dicha información.

La Figura 3.21 muestra el diagrama de flujo del programa implementado en Arduino con el objetivo de obtener la información de consumo y enviársela al sistema SGE.



**Figura 3.21 Diagrama de flujo del algoritmo implementado en el módulo Arduino Mega**

### 3.5. Comunicación entre el medidor de energía y el módulo Arduino.

SPI (Serial Peripheral Interface) es un protocolo de transmisión síncrono de datos usado ampliamente por microcontroladores para comunicarse con uno o más dispositivos periféricos de manera rápida y a distancias cortas. También es usado para comunicar dos microcontroladores. Entre los dispositivos periféricos están sensores, memorias, actuadores.

En una comunicación SPI siempre hay un dispositivo maestro (usualmente un microcontrolador) que controla a los dispositivos periféricos, esclavos. Típicamente hay tres líneas de comunicación común en todos los dispositivos:

- MISO (Master In Slave Out): la línea del esclavo para enviar datos al maestro.
- MOSI (Master Out Slave In): la línea del maestro para enviar datos a los periféricos.
- SCK (Serial Clock): los pulsos de reloj, los cuales sincronizan la transmisión de datos. Este es generado por el maestro.
- SS (Slave Select): un pin en cada dispositivo esclavo que el maestro puede usar para habilitar y deshabilitar la comunicación. Esta línea de comunicación es específica para cada dispositivo.

El chip de energía tiene una interfaz SPI incorporada. Por lo tanto en este diseño, la interfaz SPI se utiliza con el módulo Arduino para la comunicación. El diagrama de conexiones y otras especificaciones sobre el Arduino Mega se pueden encontrar en [20].

La funcionalidad del ADE7753 es accesible a través de varios registros. El contenido de estos registros puede ser actualizado o leído utilizando la interfaz SPI en el chip. La Figura 3.22 muestra la configuración de pines del medidor de energía y el Arduino. Un resistor *pull up* debe ser conectado al pin IRQ del ADE7753. Este pin proporciona un estado en abajo cuando una interrupción es generada por el ADE7753, lo cual es muy útil para informar al Arduino de que un dato está listo para ser leído. Este pin es conectado a una de las interrupciones externas del Arduino Mega. En [20] se especifican los pines SPI y de interrupciones externas asociados al Arduino Mega.



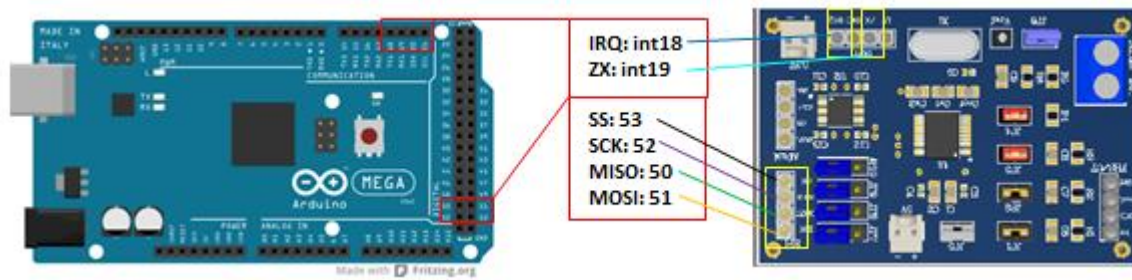


Figura 3.22 Esquema de conexión del bus SPI del ADE7753 y el Arduino Mega

### 3.6. Diseño PCB

Durante el diseño del PCB se tomaron en cuenta las recomendaciones de las hojas de datos técnicos de los elementos. Se realizaron dos diseños por separado del sensor de corriente (FHS 40-P SP600) y el circuito encargado de calcular el consumo energético (ADE7753). La mayor parte de los componentes utilizados para el prototipo son de montaje superficial (SMD).

En la Figura 3.23 muestra el esquema eléctrico para el sensor de corriente. La figura 3.24 muestra el diseño finalizado para el PCB.

Los *pads* y sus dimensiones para el sensor de corriente FHS40-P SP600 fueron extraídas de su respectiva hoja de especificaciones. Además, se siguieron algunas recomendaciones encontradas en ese mismo documento las cuales se citan a continuación. Los capacitores fueron colocados lo más cercano posible al integrado para evitar inductancias parasitas en las pistas y se colocó un plano de tierra para reducir perturbaciones debidas a corrientes capacitivas.

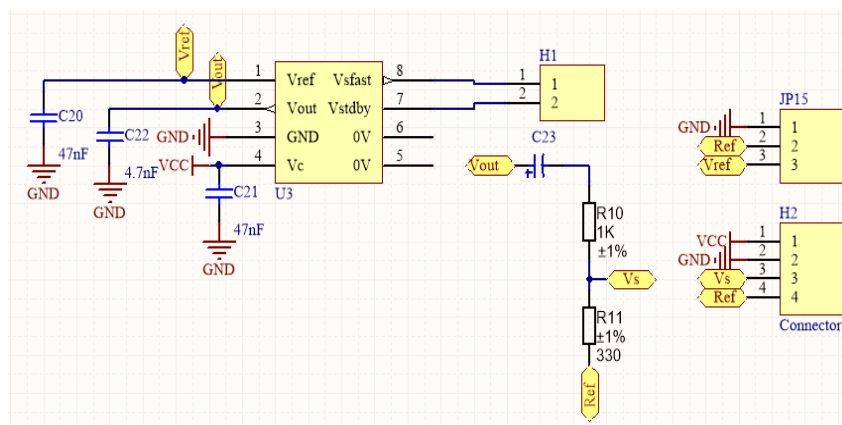
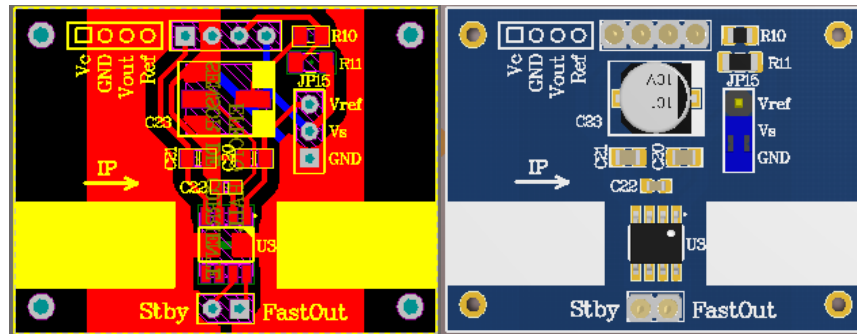


Figura 3.23 Esquema eléctrico para el sensor de corriente

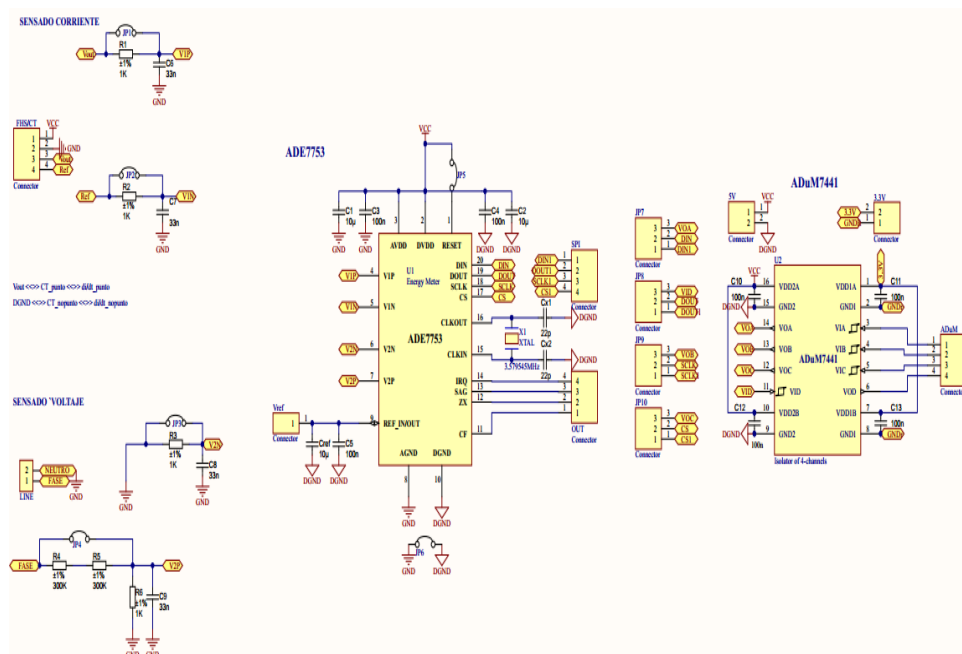




**Figura 3.24** Diseño final del PCB - sensor de corriente

Para el diseño del correspondiente circuito del ADE7753, se colocaron los elementos cerca del circuito integrado y evitaron trayectorias largas innecesarias que se pudieran traducir en pérdidas, dado que los niveles de tensión con los que se trabajan son pequeños. Además, en [19] se sugiere que para mantener el ruido de tierra al mínimo, el plano de tierra analógica debería conectarse al plano de tierra digital en un solo punto. También se siguieron algunas de las características de diseño encontradas en [21], como el uso de varios *jumper*, que permiten introducir señales de manera directa al ADE7753. Esto con el objetivo de realizar pruebas de funcionamiento con un generador de funciones y osciloscopio.

La Figura 3.25 muestra el esquema eléctrico para el ADE7753 encargado de calcular el consumo energético. La Figura 3.26 muestra el diseño finalizado.



**Figura 3.25 Esquema eléctrico del ADE7753**

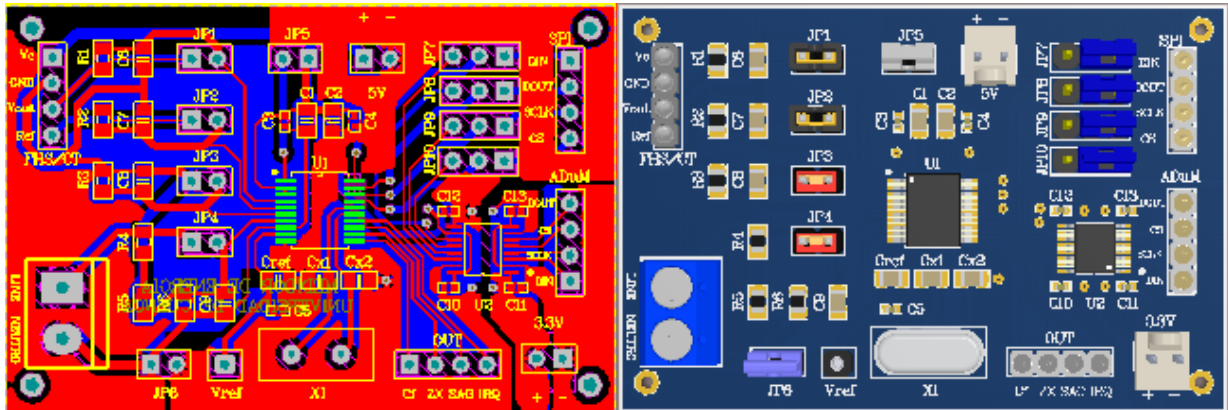
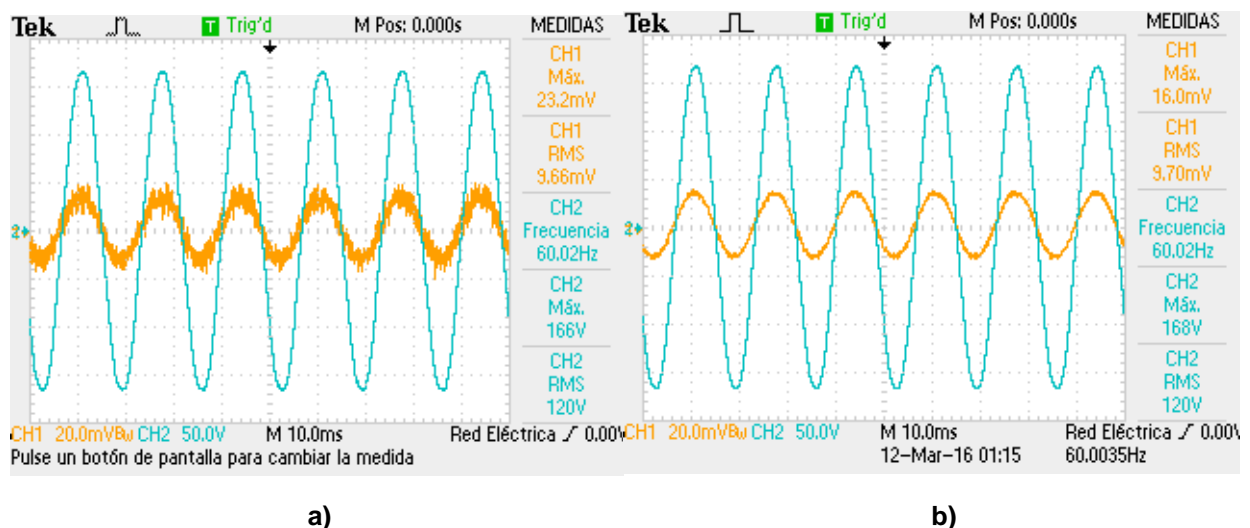


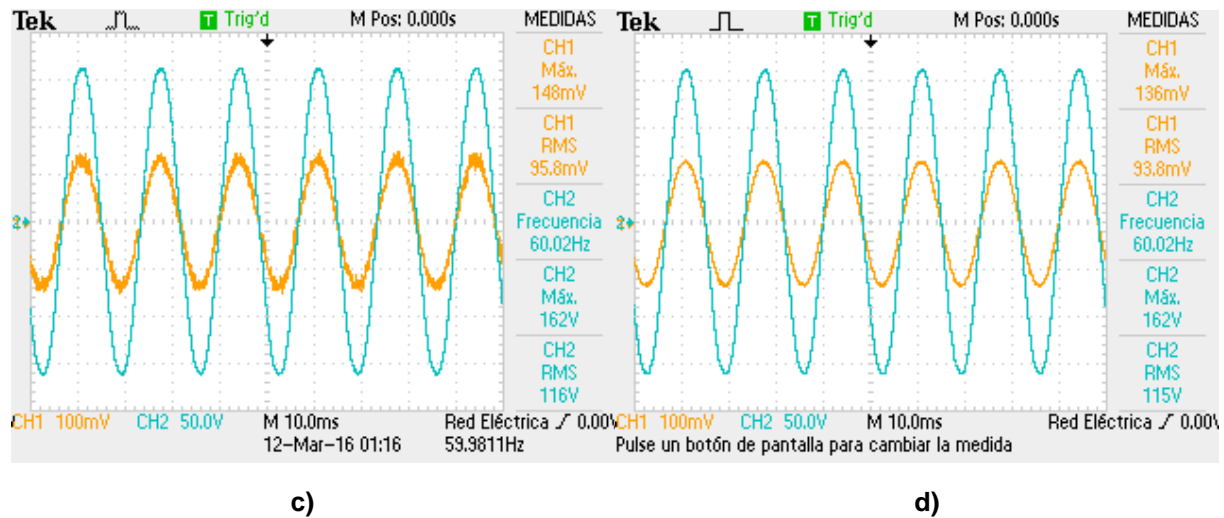
Figura 3.26 Diseño final del PCB - ADE7753

### 3.7. Pruebas de funcionamiento

#### 3.7.1. Pruebas realizadas con el sensor de corriente FHS40-P SP600

El sensor de corriente fue puesto a prueba conectándolo a cargas con diferentes potencias nominales, desde un foco de 100Watts hasta una plancha de 1200Watts, las cuales consumen de 1A (rms) a 10A (rms) respectivamente. La Figura 3.26 muestra los resultados obtenidos para el sensor de corriente.





**Figura 3.27 Mediciones realizadas en el sensor de corriente**

En la Figura 3.27, las señales en naranja corresponden a la salida del sensor de corriente, mientras que las señales en azul corresponden a la línea de tensión. Se puede observar que ambas señales se encuentran en fase y que la línea de tensión corresponde a una línea doméstica de 120V - 60Hz.

La Figuras 3.27 a) y b) muestran la salida del sensor de corriente cuando una corriente de 1A circula sobre el mismo y en la Figuras 3.27 c) y d) corresponden a una corriente de 10A. Como se observa en la Figura 3.27 a), ésta señal es de naturaleza senoidal, y está en el rango de los milivoltios, por lo que es natural que se observe cierto nivel de ruido en la señal. Sin embargo, el nivel de ruido disminuye para corrientes mayores, como se observa en la Figura 3.27 c). En la figura 3.27 b) se observa la misma señal que en la Figura 3.27 a) pero utilizando un filtro de promediado propio del osciloscopio. El voltaje máximo para el canal de corriente observado en la Figura 3.27 b) es de 16mV, y corresponde a 1A. Tomando como referencia este valor de 16mV por 1A, podemos calcular la corriente máxima rms que podríamos ingresar al ADE7753.

La hoja de datos técnicos del ADE7753 recomienda que el voltaje diferencial y con respecto a tierra de cada canal de entrada, V1P/V1N y V2P/V2N, no exceda los  $\pm 0.5V$ . Sin embargo, también especifica que el integrado es capaz de soportar mayores niveles, por ejemplo, menciona que con un nivel de entrada de  $\pm 0.794V$ , el ADC proporciona una salida codificada máxima de  $\pm 262144d$ .

Con el dato de 16mV/ARMS que se obtuvo anteriormente y tomando como referencia el valor de 0.5Vmax en la entrada, podemos calcular el rango de corriente máxima rms que podemos medir e ingresar al ADE7753 para este diseño.

$$I_{ARMSmax} = \frac{0.5V/\sqrt{2}}{0.016V/ARMS} = 22.1ARMS$$

El valor de 22.1ARMS (que equivalen a 31.25 A pico) representa la corriente máxima RMS que debería circular sobre el sensor de corriente para producir un voltaje máximo



de 0.5V. Sin embargo, si se considera que el ADE7753 es capaz de soportar a su entrada un nivel de tensión de  $\pm 0.794V$ , esto resulta en que la corriente máxima RMS medible es de aproximadamente 35A.

Claro está, sugerimos seguir las recomendaciones dadas por el fabricante. En la Figura 3.27 c), que corresponde a una corriente de 10ARMS a través del sensor, se observa un máximo de 148mV y con el valor de 16mV/A, podemos calcular el error existente entre los valores experimentales y los teóricos.

$$V_{out}(10A_{RMS}) = 16 \frac{mV}{A_{RMS}} \cdot 10A_{RMS} = 160mV$$

$$ERROR = 160mV_{teorico} - 148mV_{medido} = 0.012V$$

De lo anterior, se concluye que el error es relativamente grande cuando sensamos y tomamos como referencia corrientes pequeñas (1A). Sin embargo, éste debe reducirse para corrientes mayores.

Para alcanzar mayores corrientes, se debe redimensionar el divisor de tensión (colocado a la salida del sensor de corriente), de tal manera que no se excedan los 0.5V al ingreso del ADE7753 recomendados.

### 3.7.2. Pruebas realizadas con el medidor de energía ADE7753.

En un inicio se realizaron pruebas de funcionamiento del ADE7753 con ayuda de un generador de onda, y una señal proveniente de un divisor de tensión. Esto con el objetivo de calibrar el CI medidor de energía. En [19] se menciona a detalle el proceso de calibración del ADE7753. Sin embargo, es necesario mencionar que se realizaron calibraciones a nivel de software para obtener mayor precisión con valores de corriente pequeños, esto debido a que en el presente proyecto los datos de consumo son tomados de un prototipo de casa a escala cuyo consumo bordea los 160Watts.

Para poner en marcha el ADE7753, éste dispone de una interfaz SPI para la comunicación con sistemas maestros. Se utilizó un Arduino Mega, para el envío de comandos de configuración y petición de datos. El programa realizado en Arduino, imprime en pantalla los datos de consumo (Wh), voltaje (VRMS), corriente (ARMS), frecuencia (Hz), y potencia de la carga conectada (Watts).

Las figuras 3.28 a 3.32 muestran los resultados obtenidos con señales que representan diferentes valores de corriente. El voltaje de línea es igual al voltaje de consumo residencial, 120 V.

```
*****
>>CONSUMO: 1.0207 Wh
>>Voltaje: 119.99 Vrms
>>Corriente: 29.73 Arms
>>frecuencia: 60 Hz
>>Potencia Carga ~aprox: 3655 Watts
>>Consumo Total: 0.0526 KWh
*****
```

**Figura 3.28 Señal de 504 mV, Irms = 30A, Vrms = 120V, P= 3600W**

```
*****
>>CONSUMO: 0.4926 Wh
>>Voltaje: 119.15 Vrms
>>Corriente: 14.54 Arms
>>frecuencia: 60 Hz
>>Potencia Carga ~aprox: 1767 Watts
>>Consumo Total: 0.2361 KWh
*****
```

**Figura 3.29 Señal de 252 mV, Irms = 15A, Vrms = 120V, P= 1800Watts**

```
*****
>>CONSUMO: 0.3432 Wh
>>Voltaje: 118.25 Vrms
>>Corriente: 9.21 Arms
>>frecuencia: 60 Hz
>>Potencia Carga ~aprox: 1183 Watts
>>Active el Consumo Total
*****
```

**Figura 3.30 Señal de 150 mV, Irms = 10A, Vrms = 120V, P = 1200Watts**

```
*****
>>CONSUMO: 0.0277 Wh
>>Voltaje: 117.91 Vrms
>>Corriente: 1.04 Arms
>>frecuencia: 60 Hz
>>Potencia Carga ~aprox: 99 Watts
>>Consumo Total: 0.0186 KWh
*****
```

**Figura 3.31 Señal de 23.2 mV, Irms = 1A, Vrms = 120V, P = 120Watts**



```
*****  
>>CONSUMO: 0.0000 Wh  
>>Voltaje: 122.16 Vrms  
>>Corriente: 0.29 Arms  
>>frecuencia: 60 Hz  
>>Potencia Carga ~aprox: 0 Watts  
>>Active el Consumo Total  
*****
```

**Figura 3.32 Señal de 12.4 mV, Irms = 0A, Vrms = 120V, P = 0Watts**

El primer dato observado en las figuras 3.28-3.32, representa el consumo instantáneo [Wh], el segundo representa el voltaje de línea (120V), el tercero muestra la corriente que circula hacia la carga [A], el cuarto representa la frecuencia de la línea [Hz], el quinto representa la potencia de la carga conectada [W] y el último dato representa el consumo acumulado [KWh].

De los resultados mostrados anteriormente, se observa que el error aumenta a medida que el consumo disminuye. Esto es razonable debido a que el nivel de ruido existente tiene mayor efecto cuando se trata de cargas pequeñas.

En general, el CI ADE7753 cumple un buen funcionamiento como medidor de energía, facilitando procesos, código, cálculos y accesibilidad a la hora de obtener la información de consumo energético.



# CAPÍTULO 4

## SIMULACIÓN DEL HARDWARE EN LAZO INCORPORANDO EL PROTOTIPO DE MEDIDOR INTELIGENTE

Con el propósito de diseñar un algoritmo de respuesta de a la demanda y probar el comportamiento del mismo se procede a mostrar el diseño, implementación y resultados de la simulación de HIL en Simulink, en donde se incorpora el medidor inteligente expuesto en el capítulo 3 como parte de una red de medidores que poseen características de respuesta a la demanda dentro de una red eléctrica. El software desarrollado está compuesto por las siguientes partes:

- Simulación de la infraestructuras de medición avanzada
- Simulación del consumo en cada casa y de los medidores inteligentes
- Simulación de cargas HVAC y programables
- Desarrollo del algoritmo de repuesta a la demanda basado en controladores difusos

El software está diseñado para simular 24 horas (86400 seg.)

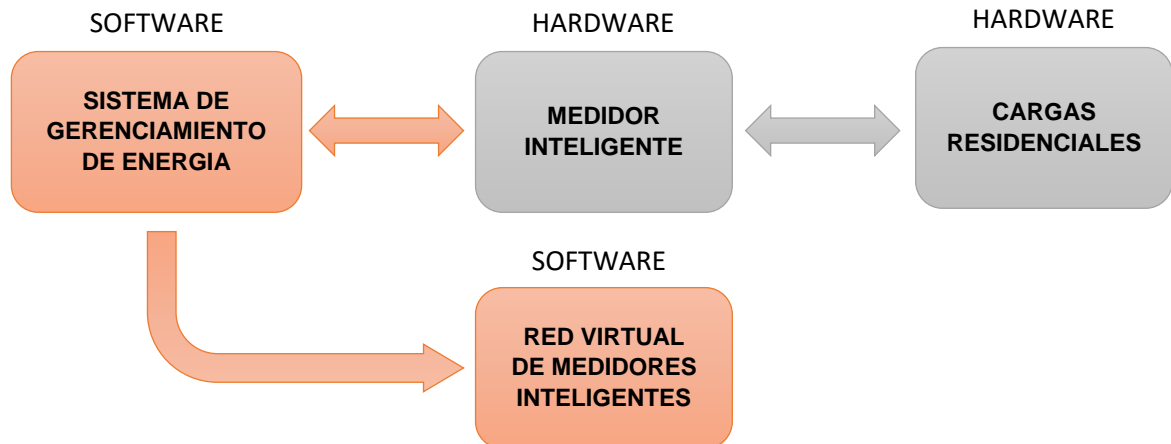
### 4.1. Sistema HIL desarrollado

La simulación HIL que se realiza en este trabajo está constituida como sigue:

- Sistema de gerenciamiento de energía (SGE): Simulación MATLAB
- Red virtual de medidores inteligentes: Simulación MATLAB
- Prototipo medidor inteligente: Hardware
- Cargas residenciales: Simulación por Hardware

El sistema que se desea reproducir dentro de la plataforma de ensayo se muestra en la Figura 4.1. Ésta corresponde al SGE interactuando con el medidor inteligente que a su vez monitorea el consumo energético y gestiona el uso de cargas programables y tipo HVAC. Por otro lado, el SGE también interactúa con una red virtual de medidores inteligentes que permite desarrollar el concepto de respuesta a la demanda.





**Figura 4.1 Plataforma de Ensayo del sistema HIL**

## **4.2. Simulación de la red de interacción del medidor inteligente**

El Centro de Electromecánica de la Universidad de Texas en Austin (The University of Texas at Austin Center for Electromechanics) ha desarrollado en Simulink un modelo que simula el comportamiento de la red de distribución de una red inteligente. El modelo contiene casas capaces de producir su propia energía interactuando con la red inteligente.

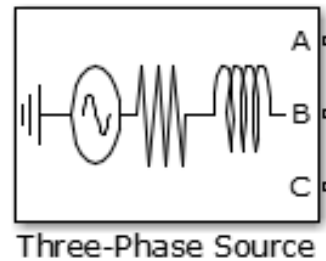
Para comprobar el funcionamiento de las funciones de respuesta a la demanda del medidor inteligente desarrollado y descrito en el capítulo 3, se usa el modelo representado por el diagrama unifilar de la red de distribución, representado en la Figura 4.3.

### **4.2.1. Red eléctrica y transformador de subestación**

El diagrama unifilar de la red de distribución de la Figura 4.3 muestra la estructura del sistema simulado en el SimPowerSystems de Simulink. La primera etapa mostrada en el diagrama comprende la conexión de la red eléctrica con el transformador de distribución. Esta sección consigue reducir los voltajes altos provenientes de las estaciones de generación a voltajes que faciliten la distribución de energía sobre la zona en que se encuentre.

En Simulink bajo la librería “*SimPowerSystems*” encontramos el bloque “*Three-Phase Source*” mostrado en la Figura 4.2, con este bloque de generación se simula el transformador de distribución, dando en su salida un voltaje de magnitud 12470Vrms.



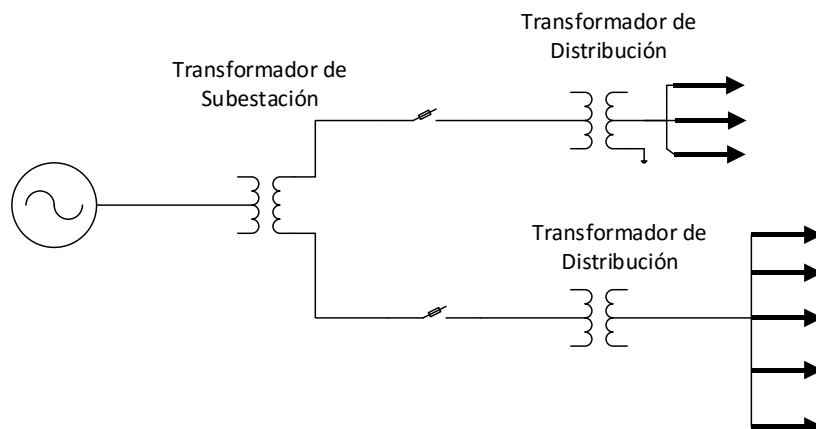


**Figura 4.2 Bloque Three-Phase Source**

El bloque simula un generador trifásico conectado en Y, conectando cada fase a un neutro interno el mismo que se encuentra conectado a tierra. Entre los parámetros de configuración del bloque se establece el voltaje entre fases deseado de 12470 V rms, la frecuencia a 60Hz, y un desfase de  $120^\circ$  entre la fase B con respecto a la fase A y de  $240^\circ$  entre C con respecto a la fase A [22].

Este bloque sin embargo no tiene un umbral para limitar la potencia que la red vaya a consumir en el transcurso de la simulación.

El bloque de generación a su salida es conectado a un medidor trifásico, este permite ver el comportamiento tanto de la potencia consumida por la red, así como de la corriente y el voltaje con respecto a tierra de cada una de las fases. La Figura 4.4 muestra el comportamiento descrito de cada una de las tres fases [23].



**Figura 4.3 Diagrama unifilar de la red de distribución simulada**

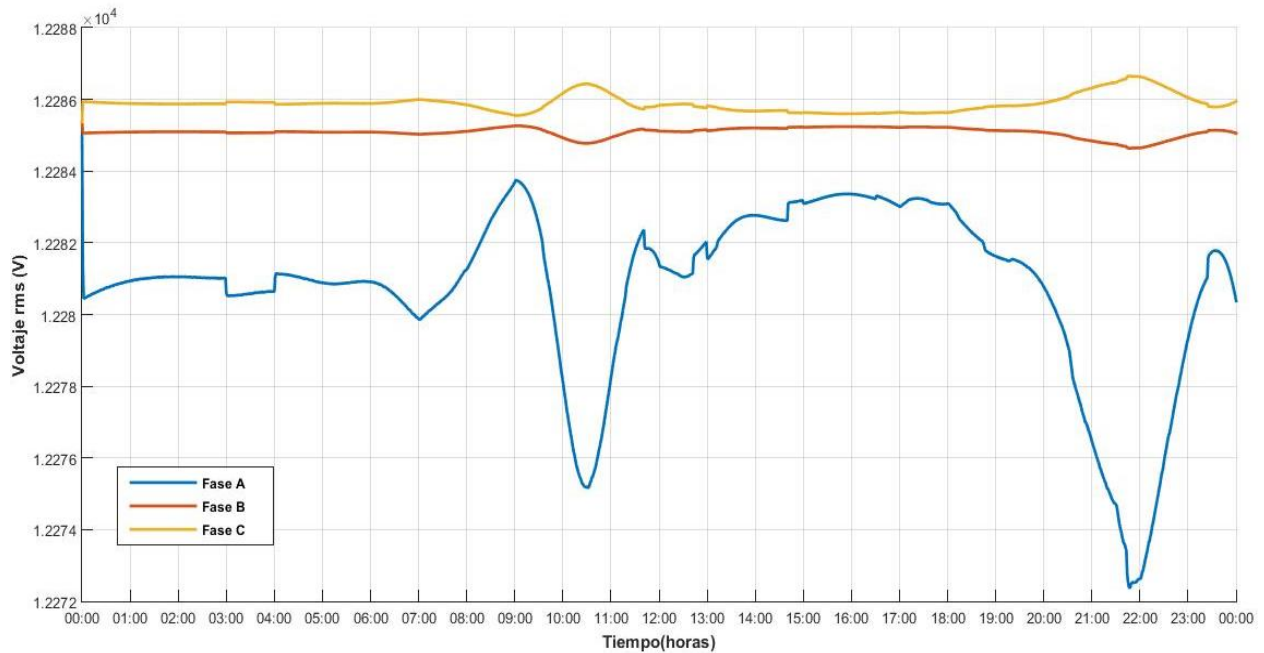


Figura 4.4 Voltaje RMS en cada fase

Luego de conectar las salidas del generador al medidor trifásico, se simula la línea de transmisión, empleando el bloque “Three-Phase PI Section Line” mostrado en la Figura 4.5.

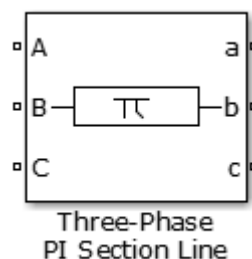


Figura 4.5 Bloque Three-Phase PI Section Line

Este bloque implementa el modelo de una línea de transmisión trifásica cuyos parámetros están agrupados en una sección tipo  $\pi$ . Esto hace que en lugar de representar la resistencia, capacitancia e inductancia de la línea de transmisión de manera uniformemente distribuida a lo largo de la línea, representamos todos estos parámetros agrupados en una sola sección  $\pi$ , esto se muestra en la Figura 4.6.

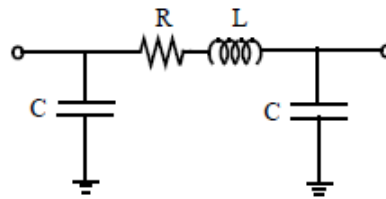


Figura 4.6 Sección PI

Los parámetros asignados para la simulación son los siguientes:

$$Frecuencia = 60\text{Hz}$$

$$Resistencia (\Omega/\text{Km}) = 0.01273$$

$$Capacitancia (\text{F}/\text{Km}) = 0.9337e^{-3}$$

$$Inductancia (\text{H}/\text{Km}) = 12.74e^{-9}$$

$$Longitud \text{ de la línea} = 10\text{Km}$$

#### 4.2.2. Transformadores de distribución

El diagrama unifilar muestra a los transformadores de distribución a ser alimentados por el transformador de la subestación. En esta etapa se consiguen reducir los altos voltajes a valores domésticos (220/110V). En el diagrama de la Figura 4.3 se muestran dos transformadores de distribución, el primero se conecta a un grupo de cargas residenciales y el segundo al vecindario en el cual interactúa el medidor inteligente y permite probar las funciones de respuesta a la demanda del mismo. Para simular el conjunto de cargas residenciales alimentadas por el primer transformador de distribución se conecta a una carga trifásica de 1 MW.

Los transformadores de distribución son simulados mediante los transformadores residenciales de la librería “SimPowerSystems” de Simulink, mostrados en la Figura 4.7.

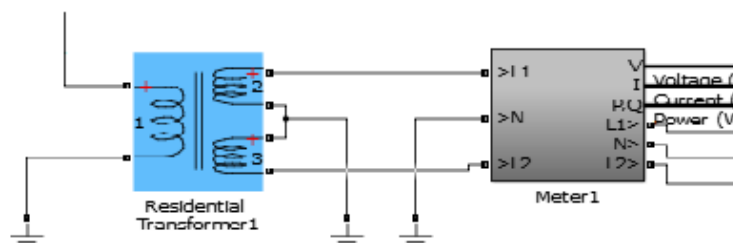
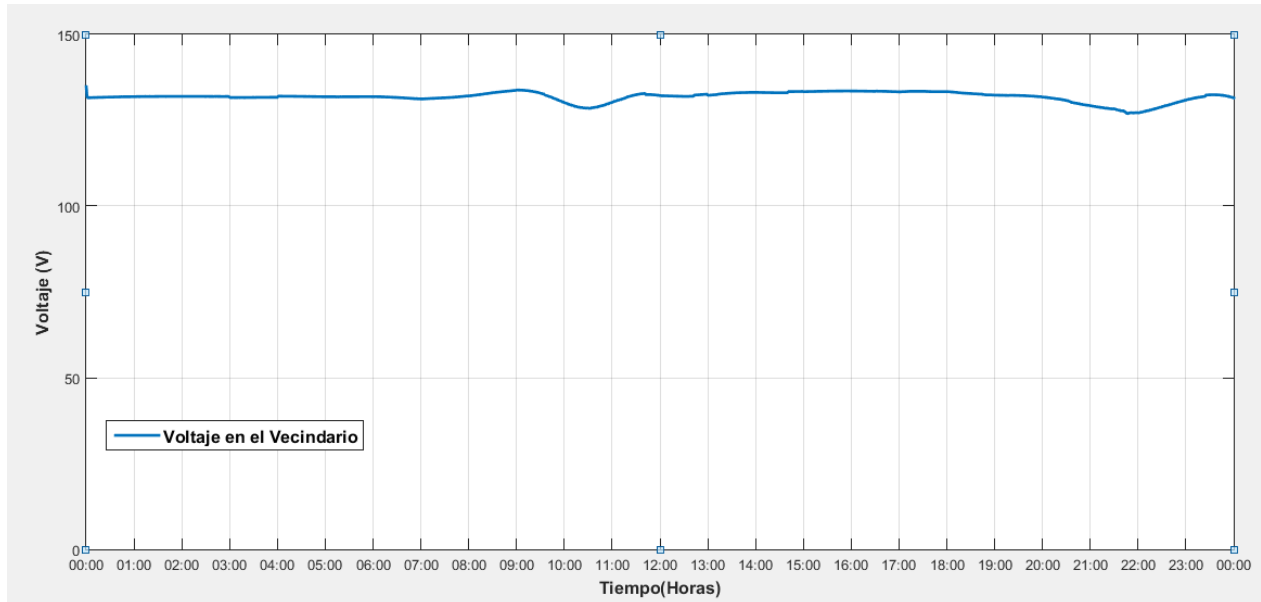


Figura 4.7 Transformador residencial

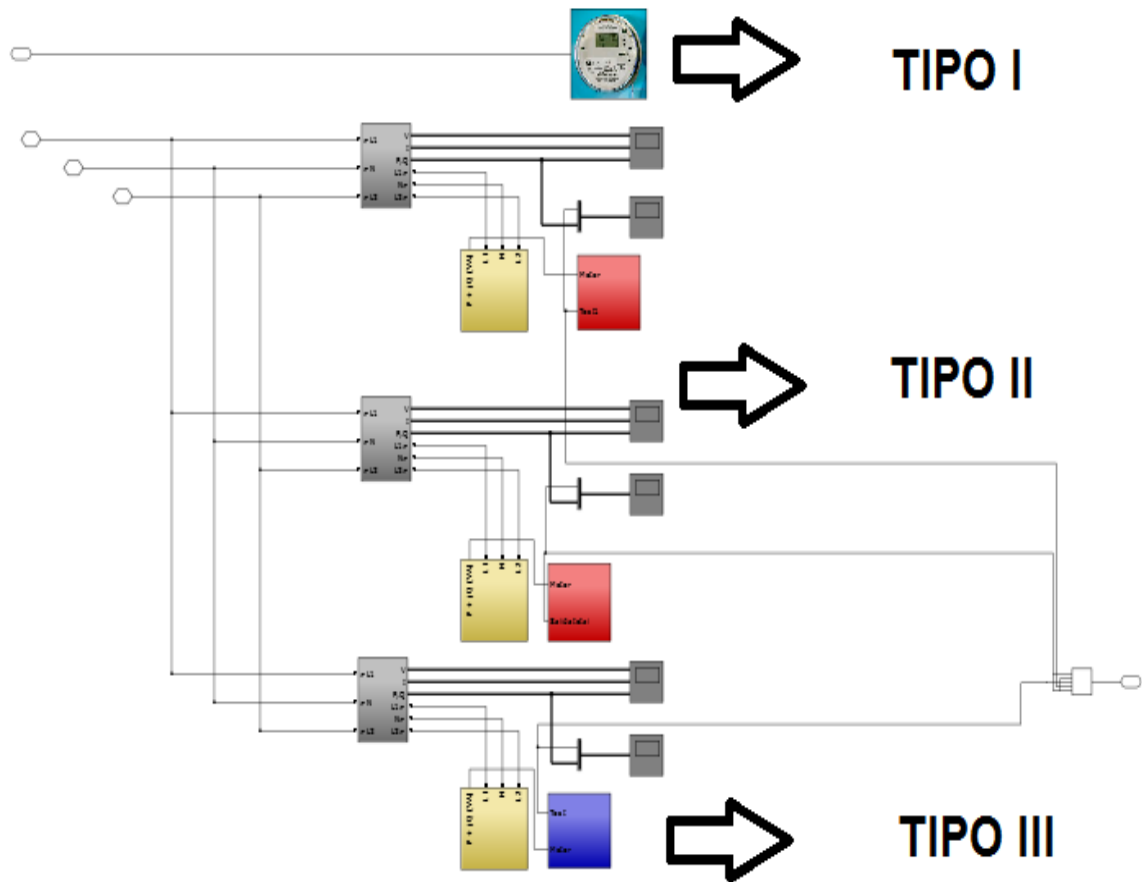
El transformador de distribución es alimentado por el transformador de la subestación, recibiendo un voltaje de 12470 V. En las salidas del transformador, Simulink permite

configurarlo de modo que el voltaje de salida tenga una magnitud de 120 V rms, valor medido entre cada línea con respecto al neutro. La Figura 4.8 muestra la magnitud del voltaje que se aplica en el vecindario.



**Figura 4.8 Voltaje suministrado al vecindario**

La parte final del diagrama muestra la conexión del segundo transformador de distribución con las cargas del vecindario que le permite interactuar al medidor inteligente con la red eléctrica. La Figura 4.9 muestra la simulación desarrollada en Simulink del mencionado vecindario, en la misma vemos que el vecindario posee tres tipos de viviendas, tipo I, II y III, la primera corresponde al prototipo de medidor inteligente, el cual interactúa de manera real con datos tomados en tiempo real del exterior. El segundo tipo de viviendas posee dos tipos de cargas, de tipo HVCA y tipo programables, cada carga posee su respectivo sistema de control difuso de manera que permiten observar el efecto del método de respuesta a la demanda. El tercer tipo de vivienda junta en un solo bloque los dos tipos de cargas antes mencionadas, y el algoritmo de respuesta a la demanda actúa de manera general sobre el consumo de toda la casa. Esta clasificación y el funcionamiento de los métodos de respuesta a la demanda se desarrollan con más detalle en las siguientes secciones.



**Figura 4.9 Vecindario de interacción del medidor inteligente**

Las siguientes secciones se centran en el desarrollo de las viviendas, la simulación del consumo de las mismas, el desarrollo de los medidores inteligentes, la conexión del prototipo de medidor inteligente descrito en el capítulo 3 con la red eléctrica simulada y la creación de los métodos de respuesta a la demanda.

### 4.3. Simulación de las viviendas

Como se mencionó en la sección anterior, el vecindario simulado contiene tres tipos de viviendas (ver Figura 4.9), cada una de las cuales es tratada de manera distinta pero cumplen todas ellas con el objetivo de probar las funciones e respuesta a la demanda. A continuación se analiza la estructura de cada una de ellas.

### 4.3.1. Vivienda tipo I

La vivienda tipo I a diferencia de la tipo II y III está compuesta de una parte de software y otra de hardware. La parte de hardware corresponde al prototipo de medidor inteligente, mientras que la parte de software corresponde a los controladores difusos desarrollados en MATLAB. Estos brindan las sentencias de control para que el medidor inteligente realice las acciones necesarias para brindar las funciones de respuesta a la demanda. La Figura 4.10 muestra un diagrama de bloque sobre el funcionamiento del medidor inteligente.

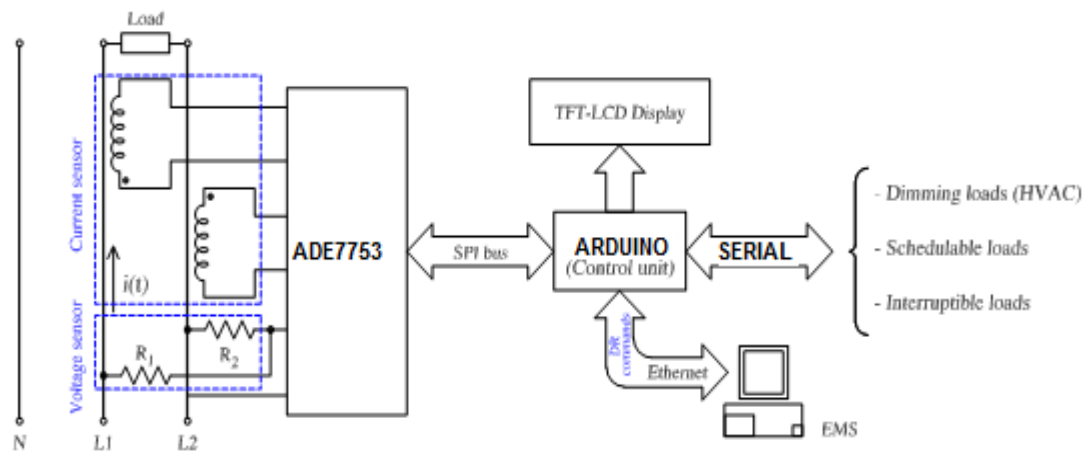
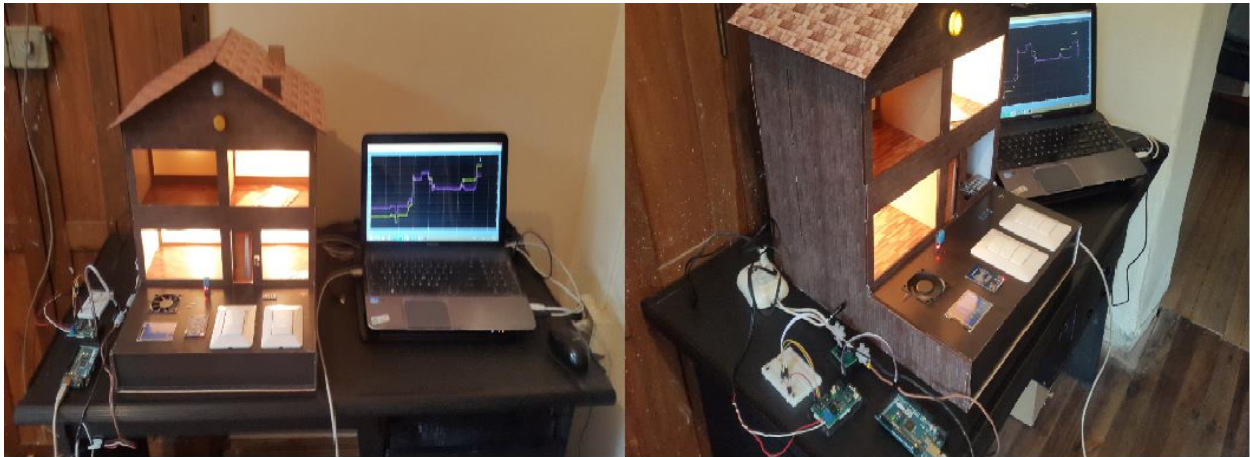


Figura 4.10 Diagrama de bloques vivienda tipo I

Como vemos en el diagrama de bloques el funcionamiento de este tipo de vivienda parte desde la medición de señales con los sensores de voltaje y corriente. Estos datos ingresan en el ADE7753, en donde se procesan y se calcula el consumo de la casa, la unidad de control basada en el ARDUINO MEGA 2560 recibe los datos del ADE7753 por medio un bus SPI, estos datos son enviados al computador sobre el cual corre la simulación, mediante una bus serial de datos, los datos enviados desde el ADE7753 son tomados como entradas del sistema de control difuso, este luego de procesar estos junto con las demás variables de entrada suministra una señal de control, la cual es enviada a las cargas, realizando las funciones de respuesta a la demanda.

Para el propósito de la simulación el medidor inteligente se lo conecta a una casa prototipo, la cual consta con cargas tipo HVAC y es posible simular en la misma el comportamiento de cargas programables. La Figura 4.11 muestra el medidor inteligente conectado a la casa prototipo mientras se realiza la simulación y se toman los datos en la PC donde se simula el sistema de gerenciamiento de energía.

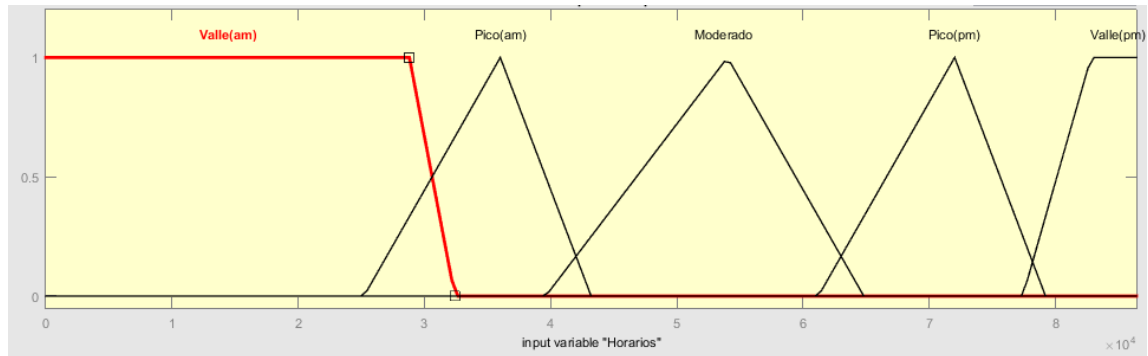


**Figura 4.11 Medidor Inteligente en funcionamiento**

En la Figura 4.12 se muestran los bloques usados para recibir la información desde la unidad de control del medidor inteligente. En esta vemos que los datos de entrada son captadas por el bloque de “*S-Function*” este bloque permite representar código escrito en lenguajes de programación como C, C++, por medio de un bloque de Simulink. En la Figura 4.12 el bloque que contiene la S-Function se lo denomina Serial Read, debido a que cumple con la función de hacer una lectura del puerto serial del PC en donde se conecta la unidad de control del medidor inteligente. Dado que el consumo real de la maqueta es mucho menor que el consumo de una vivienda familiar promedio, y debido a que el vecindario usa datos extraídos de mediciones reales en viviendas, es necesario realizar un escalamiento del consumo de la maqueta hacia los niveles del resto de viviendas de la simulación, esto se consigue multiplicando por una constante el valor obtenido de la lectura del medidor. El bloque Display muestra el consumo en tiempo real ya escalado a los niveles deseados. El algoritmo de respuesta a la demanda se realiza en el bloque Fuzzy Logic Controller SM.



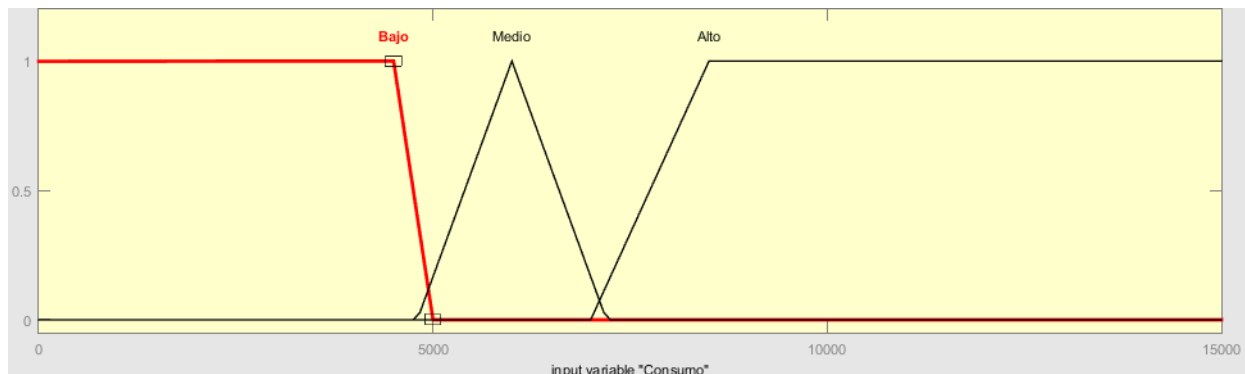




**Figura 4.13 Función de membresía "Horarios"**

### Consumo

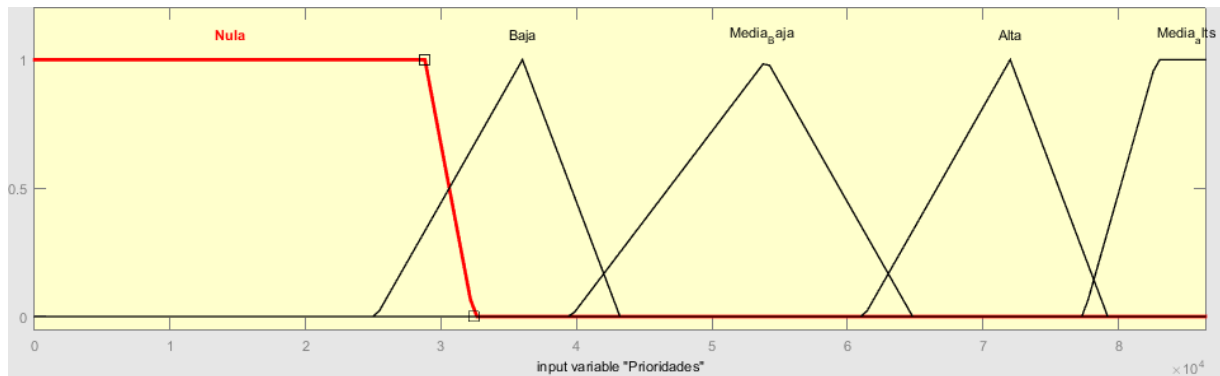
Esta función de membresía busca separar el consumo de los hogares dentro de tres categorías, consumo alto (7 KWh en adelante), medio (4.8kWh a 7.2KWh) y bajo (0 a 5KWh), tal como lo vemos en la Figura 4.14. El sistema compara los datos tomados por el medidor y se le asigna el valor de su grado de membresía según le corresponda.



**Figura 4.14 Función de membresía "Consumo"**

### Prioridades

La función de membresía "Prioridades" establecer el grado de prioridad de las cargas tipo HVAC. Por ejemplo en la Figura 4.15 muestra la distribución de las prioridades de estas cargas en función del hora del día, se nota que entre las 00:00 y las 09:00 la prioridad es nula, esto significa que no es de importancia el estado dentro de ese horario de las cargas HVAC, pudiendo estas funcionar o no sin ningún tipo de restricción. Entre las 07:00 y las 12:00 la prioridad es baja, es decir el consumo del mencionado tipo de cargas no es de mayor prioridad en este horario, esto permite al sistema regular la intensidad de las cargas en un factor grande, como ejemplo las luminarias. Para el horario comprendido entre las 11:00 y las 18:00 la prioridad es media baja, esto permite al sistema regular la intensidad de las cargas, pero en un factor menor al anterior. La prioridad es alta entre las 17:00 y las 22:00, esto hace que el sistema ocupe el factor menor factor para regular la intensidad de las cargas. Finalmente entre las 21:30 y las 23:59 la prioridad es media alta.

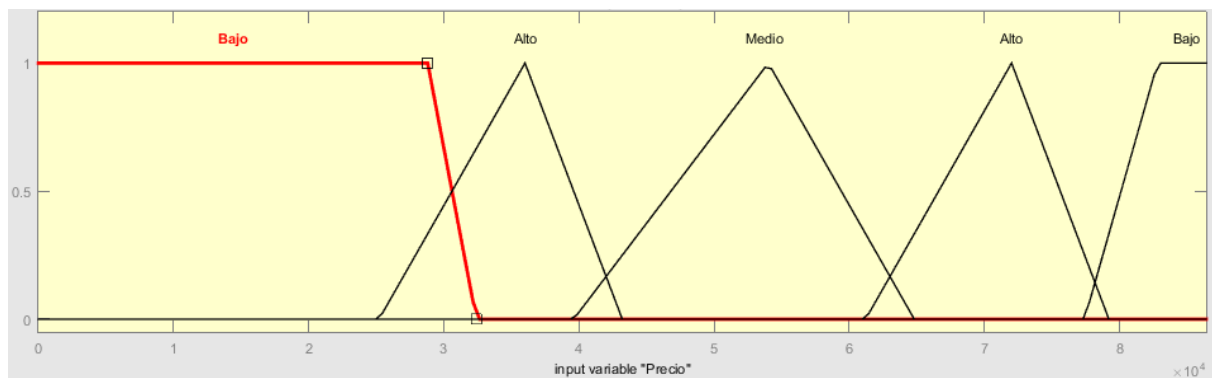


**Figura 4.15 Función de membresía "Prioridades"**

Las prioridades descritas anteriormente fueron asignadas en función de las curvas de demanda, es decir se busca reducir la prioridad de consumo de las cargas sobre todo en las horas pico, sin embargo en el pico de la tarde la prioridad asignada es alta debido a la desconformidad que produciría en las horas de la noche la reducción de las luminarias por citar un ejemplo.

### *Precio*

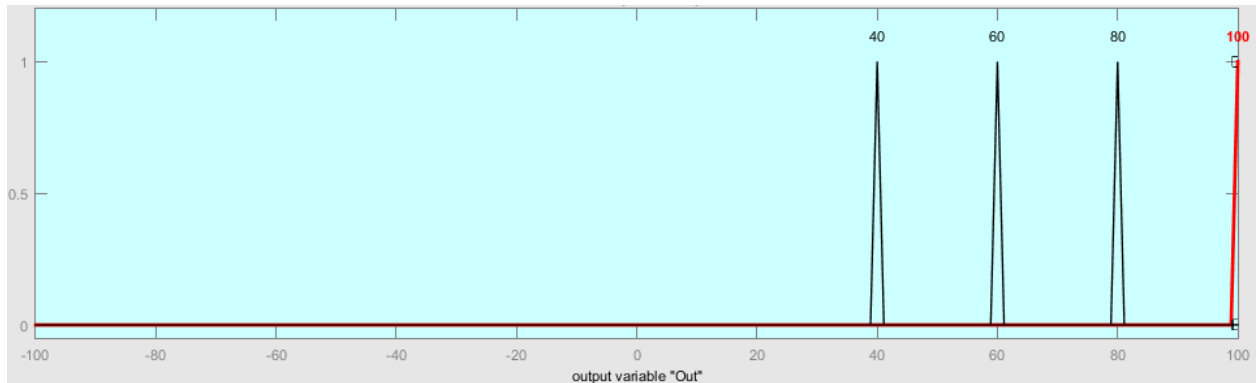
La función de membresía precio busca informar al sistema del precio de la energía, el mismo que se supone cambiante según sea la demanda, este dato en aplicaciones reales es suministrado directamente por la empresa generadora. Sin embargo, para fines del presente trabajo se establecen categorías de precios, bajo medio y alto como se ve en la Figura 4.16 los intervalos de tiempo son los mismos que para las funciones de membresía citadas anteriormente.



**Figura 4.16 Función de membresía "Precio"**

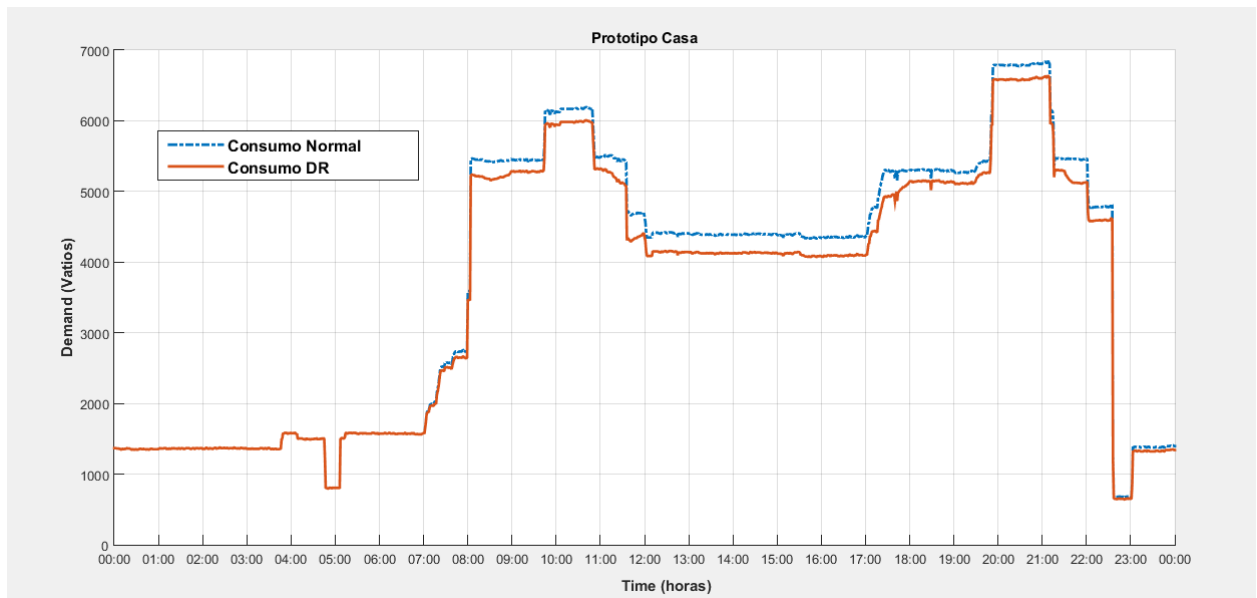
### *Salidas*

Las salidas de este bloque de control difuso definen el nivel al cual van a funcionar las cargas tipo HVAC, la Figura 4.17 muestra el conjunto de salidas de control, este valor es leído por el sistema actuador del hogar, el mismo que se encarga de reducir la intensidad del consumo de las cargas.



**Figura 4.17 Salidas del controlador difuso**

En el prototipo de vivienda sobre las cual se realizan las pruebas el grupo de cargas HVAC es representado por las luminarias del piso superior, siendo estas las que permiten regular su intensidad (ver Figura 4.11).



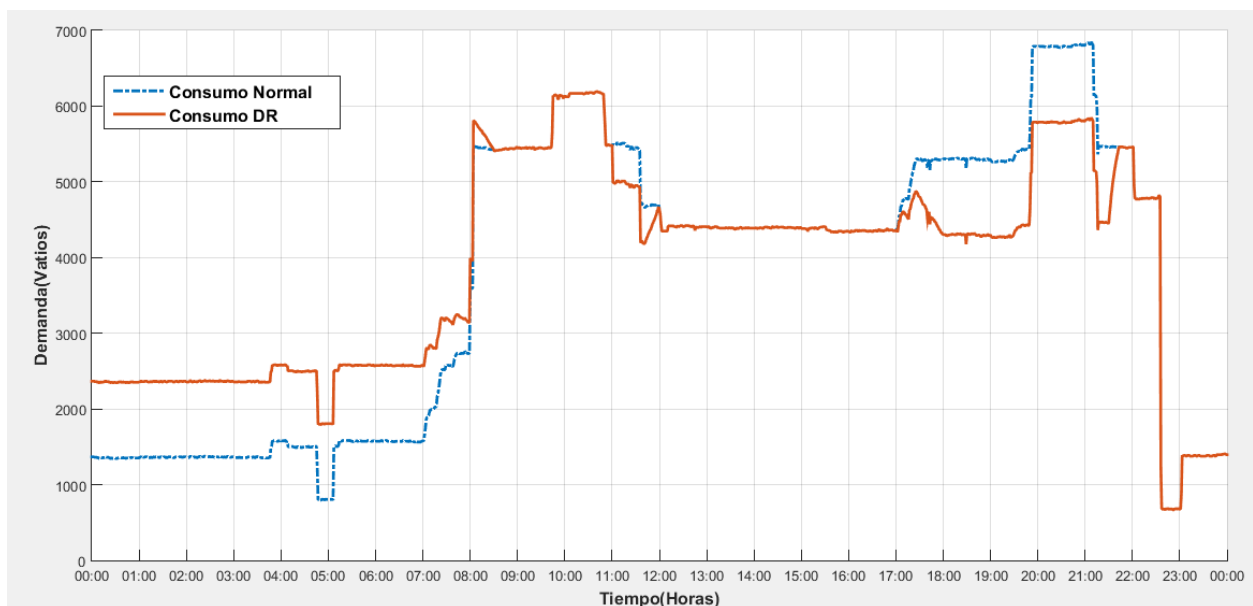
**Figura 4.18 Resultado del método de manejo de energía en cargas tipo HVAC en un prototipo de vivienda usando el medidor inteligente con funciones de respuesta a la demanda**

La Figura 4.18 presenta el primer resultado de la implementación del método de respuesta a la demanda basado en el controlador difuso descrito anteriormente, la curva en azul corresponde al consumo de la casa prototipo sin ningún control sobre la misma, la curva roja muestra el resultado de aplicar sobre la misma casa el método de respuesta a la demanda.

Las reglas con las cuales actúa el controlador difuso se encuentran en el Anexo A.

## b) Controlados difuso para cargas programables

Para el sistema de control difuso de las cargas programables se usa el algoritmo anterior como base, es decir las funciones de membresía son las mismas ya descritas en la sección anterior. Sin embargo la salida de este controlador es un 1 o un 0, de modo que en función de la señal de control que se reciba por parte del medidor inteligente, las cargas puedan operar (1 recibido) o en su defecto deban esperar (0 recibido) hasta que el medidor inteligente permita su operación. En la casa prototipo las cargas programables son simuladas al activar o desactivar un relé, el mismo que permite o niega el paso de energía a un tomacorriente en donde se conecta la carga. En la Figura 4.19 se observan los resultados de la implementación del sistema de respuesta a la demanda, esta vez ya con el algoritmo difuso que permite al medidor postergar el funcionamiento del grupo de cargas programables.



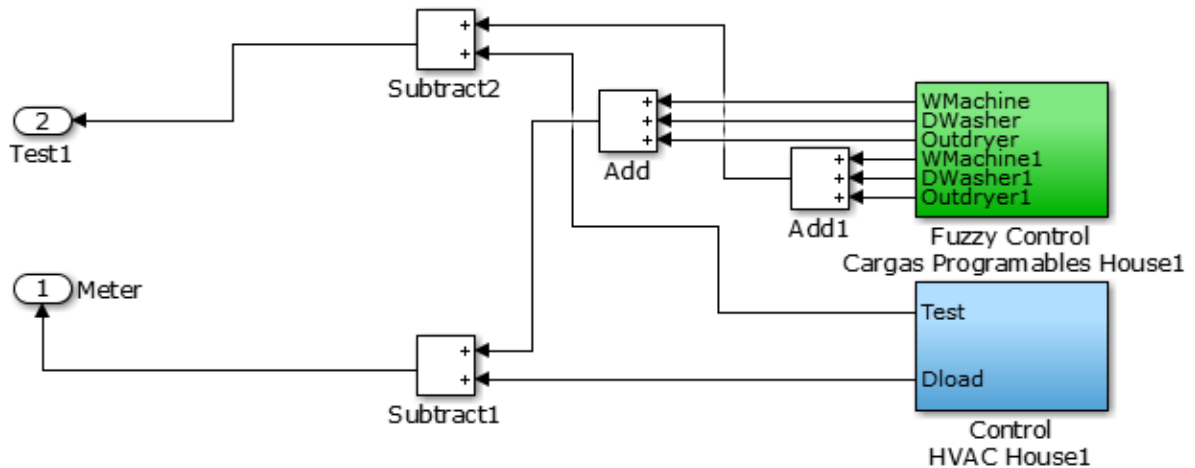
**Figura 4.19 Resultado del método de manejo de energía en un prototipo de vivienda usando el medidor inteligente con funciones de respuesta a la demanda**

En la Figura 4.19 se muestra el resultado del método de respuesta a demanda sobre el prototipo de vivienda, en la Figura 4.19 se muestra el desplazamiento del consumo desde los horarios pico de consumo hacia los horarios valle, es decir, de bajo consumo. El resultado mostrado se obtiene al postergar el uso de determinadas cargas, de modo que a estas no se les permita funcionar en horarios de alta demanda o alto precio.

### 4.3.2. Vivienda tipo II

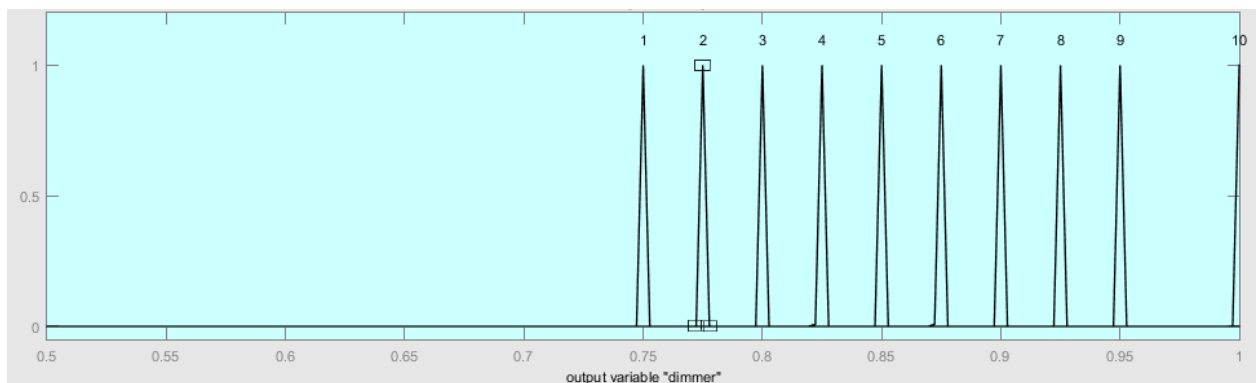
En la Figura 4.10 se ve el segundo tipo de viviendas (bloques color rojo), tanto estas como las viviendas tipo tres que se analizarán en la siguiente sección no poseen una interfaz de hardware. Las viviendas tipo II poseen dos tipos de cargas: las cargas tipo HVAC y las cargas programables, ver Figura 4.20, el consumo de cada uno de estos bloques que representan duchas cargas se lo suma a fin de tener el consumo total de la vivienda.

El bloque que representa el grupo de cargas tipo HVAC está diseñado de manera muy similar al usado para la vivienda tipo I, las diferencias radican en la forma de adquisición de los datos de consumo y en el comportamiento del controlador difuso.



**Figura 4.20 Estructura interna de las viviendas tipo II**

Los datos que simulan el consumo de este tipo de viviendas son cargados directamente desde el *workspace*<sup>1</sup> de MATLAB. Todos los datos de consumo de las viviendas tipo II y tipo III son cargados de esta manera, para realizar este proceso se ejecuta el archivo de inicialización este archivo crea todas las variables y carga los datos necesarios para realizar la simulación. Los datos son llamados del *workspace* mediante el bloque *From Workspace*, este bloque carga en memoria los datos almacenados en la variable que se especifica en la configuración del mismo. Los datos de consumo de cada casa corresponden a mediciones reales realizadas en [24].



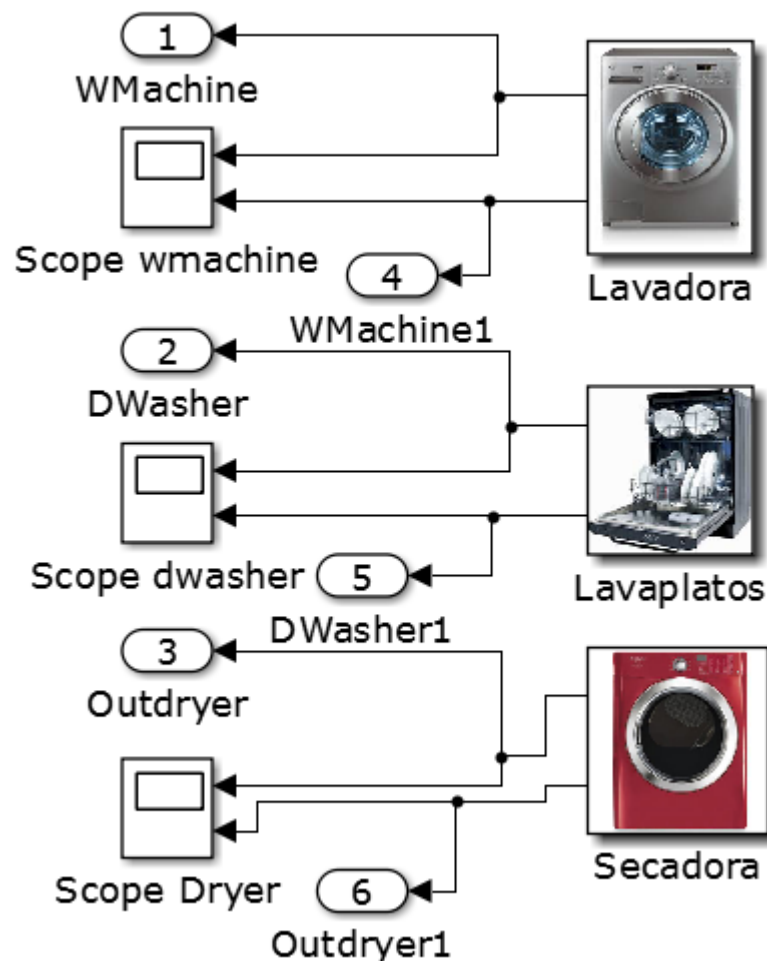
**Figura 4.21 Salidas del controlador difuso para las viviendas tipo II**

El controlador difuso para el control de estas cargas posee las mismas funciones de membresía explicadas en la sección anterior, la variación se registra en las salidas del bloque, este a diferencia del explicado en la sección anterior no proporciona el

<sup>1</sup> El "workspace" de Matlab consiste en las variables que han sido creadas y almacenadas en memoria en lo que dura una sesión de trabajo.

porcentaje al cual se debe regular el consumo de las cargas, sino proporciona un factor de dimerización, de modo que el consumo de la vivienda se multiplica por este factor, obteniendo así una reducción del consumo en función de dicho factor. La Figura 4.21 muestra las salidas que puede proporcionar el controlador, estos factores varían entre 0.75 y 1, en función de las reglas que se han diseñado para el caso. (Anexo A)

El bloque correspondiente a las cargas programables simula el consumo de tres cargas específicas de este tipo, una lavadora, un lavaplatos y un secador eléctrico de ropa (Figura 4.22).



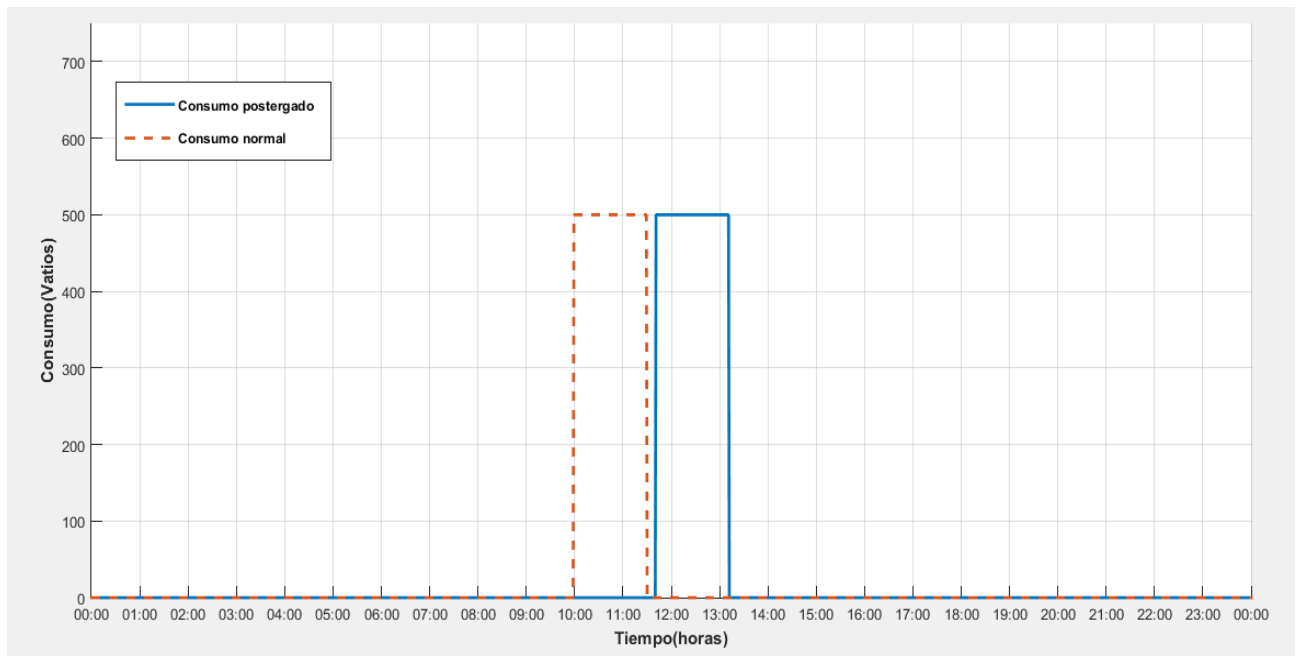
**Figura 4.22 Cargas programables simuladas**

La tabla 4.1 presenta el consumo de las cargas programables correspondientes a la vivienda House1.

**Tabla 4.1 Consumo y horario de funcionamiento de cargas programables House1**

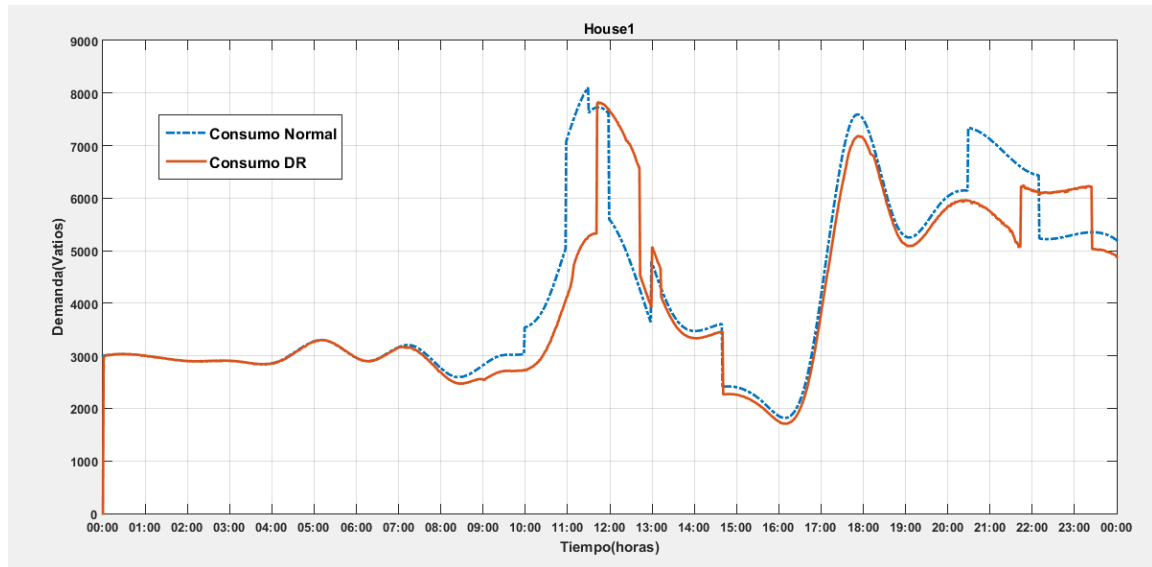
Electrodoméstico	Consumo(W)	Tiempo de uso(min)	Horario de uso
Lavadora	500	90	10:00-11:30
Lavaplatos	1200	100	13:00-14:40
Secadora	2000	60	11:00-12:00

El controlador difuso para estas cargas funciona igual que el controlador difuso para cargas programables usado para la vivienda tipo I. La salida de control del controlador en este tipo de carga es introducida en un bloque S-Function en donde el algoritmo realiza un desplazamiento del vector de consumo, obteniendo así la respuesta deseada. La Figura 4.23 muestra el resultado de este proceso para la carga Lavadora. La tabla 4.2 muestra el consumo y horario de funcionamiento para la segunda vivienda House2.

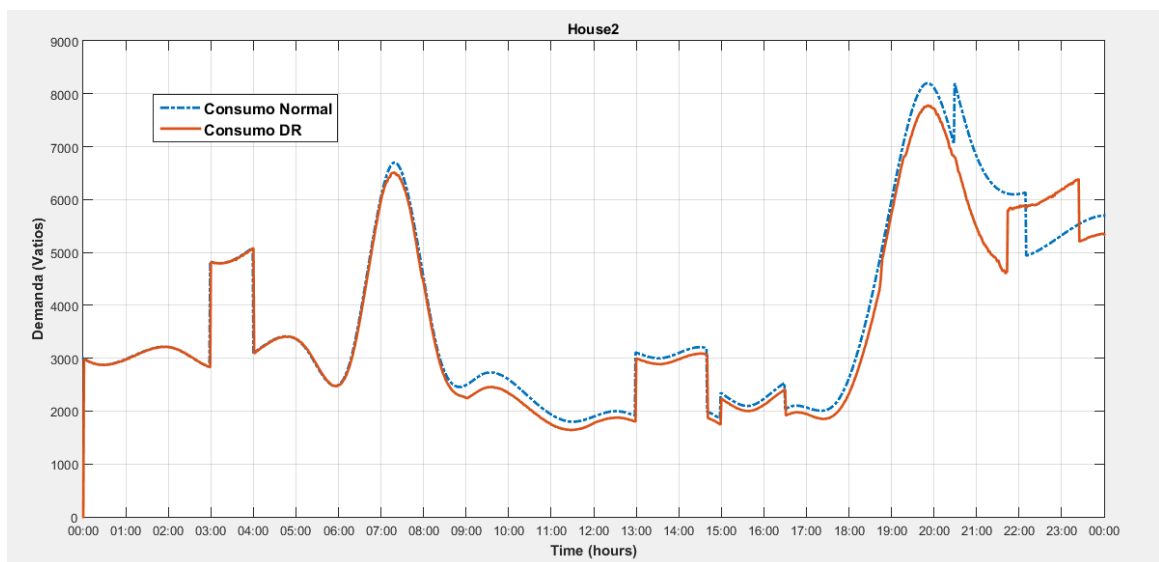

**Figura 4.23 Consumo de la lavadora normal y postergado**
**Tabla 4.2 Consumo y horario de funcionamiento de cargas programables "House2"**

Electrodoméstico	Consumo(W)	Tiempo de uso(min)	Horario de uso
Lavadora	500	90	15:00-16:30
Lavaplatos	1200	100	13:00-14:40
Secadora	2000	60	20:30-22:10

Las Figuras 4.24 y 4.25 muestran el resultado de la aplicación de los algoritmos de respuesta a la demanda para las viviendas tipo II, en estas se demuestra claramente los efectos del sistema de dimerización de las cargas tipo HVAC y la postergación de las cargas programables descritas anteriormente. Se destaca la reducción en los picos de consumo, reduciendo así la demanda de energía eléctrica en esos horarios críticos.



**Figura 4.24 Consumo normal y bajo las funciones de respuesta a la demanda para "House1"**



**Figura 4.25 Consumo normal y bajo las funciones de respuesta a la demanda para "House2"**

En la Figura 4.24 se nota que cada una de las tres cargas del grupo de programables ve postergado su funcionamiento, debido a que los horarios en los cuales estas funcionan originalmente son horarios de alta demanda. Sin embargo en la Figura 4.25 notamos que si una carga de estas es accionada en un horario que no res de alta demanda, el algoritmo de respuesta a la demanda no interviene y le permite a la carga funcionar normalmente.

### 4.3.3. Vivienda tipo III

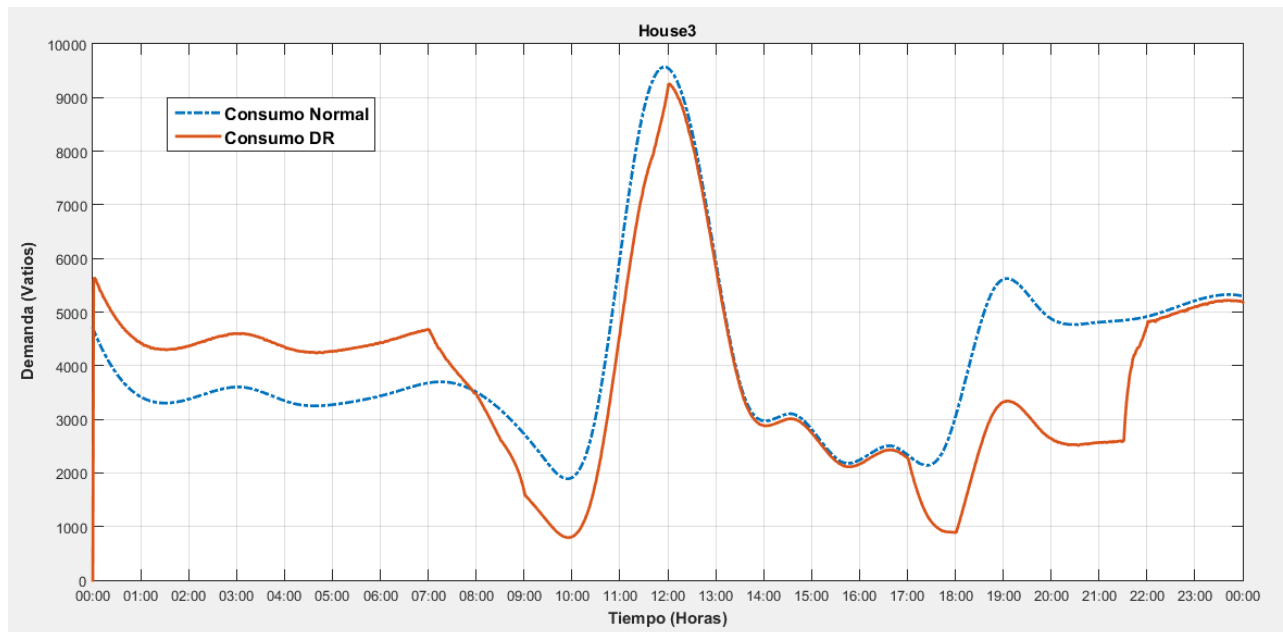
Las viviendas tipo III representadas en las Figura 4.9 no poseen un componente de hardware. Las viviendas tipo III según la Figura 4.9 son: House3, House4 y House5. Estas no poseen un bloque de cargas programables individuales a diferencia de las



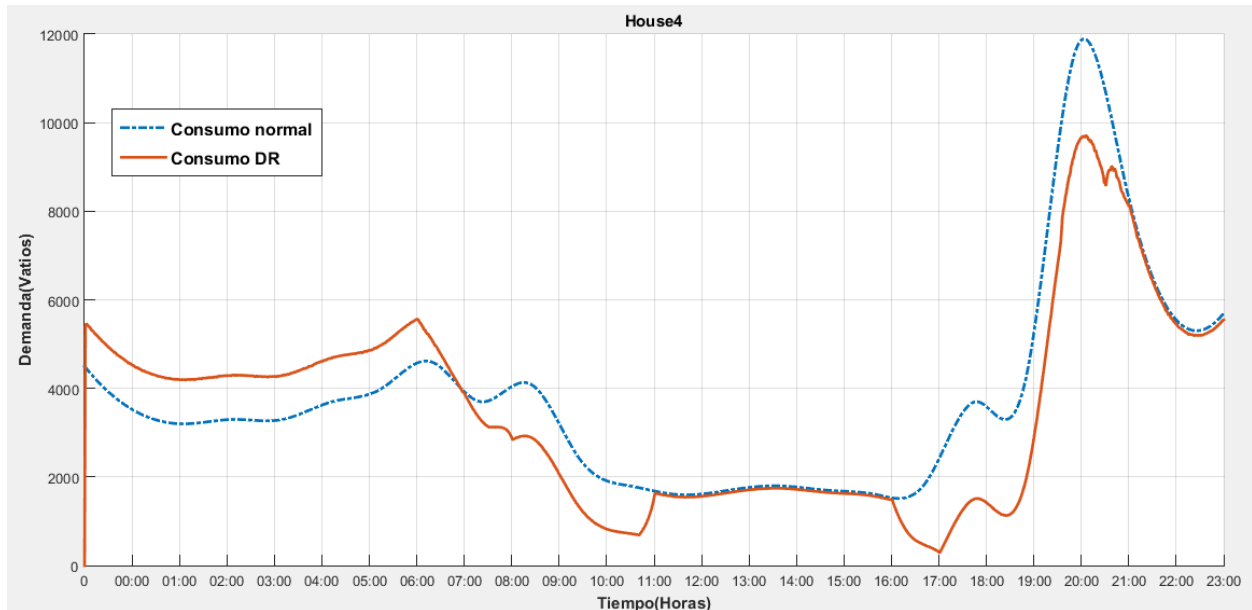
viviendas tipo II. Sin embargo también poseen dos controladores difusos, para las cargas tipo HVAC y para las cargas programables.

Las cargas programables son tratadas como un solo bloque, el bloque de control difuso responde con el valor en vatios, el cual es permitido retirar de las horas pico y lo aumenta en las horas de bajo consumo, es decir mediante este sistema el controlador difuso permite desplazar los picos de consumo a las horarios de bajo consumo eléctrico.

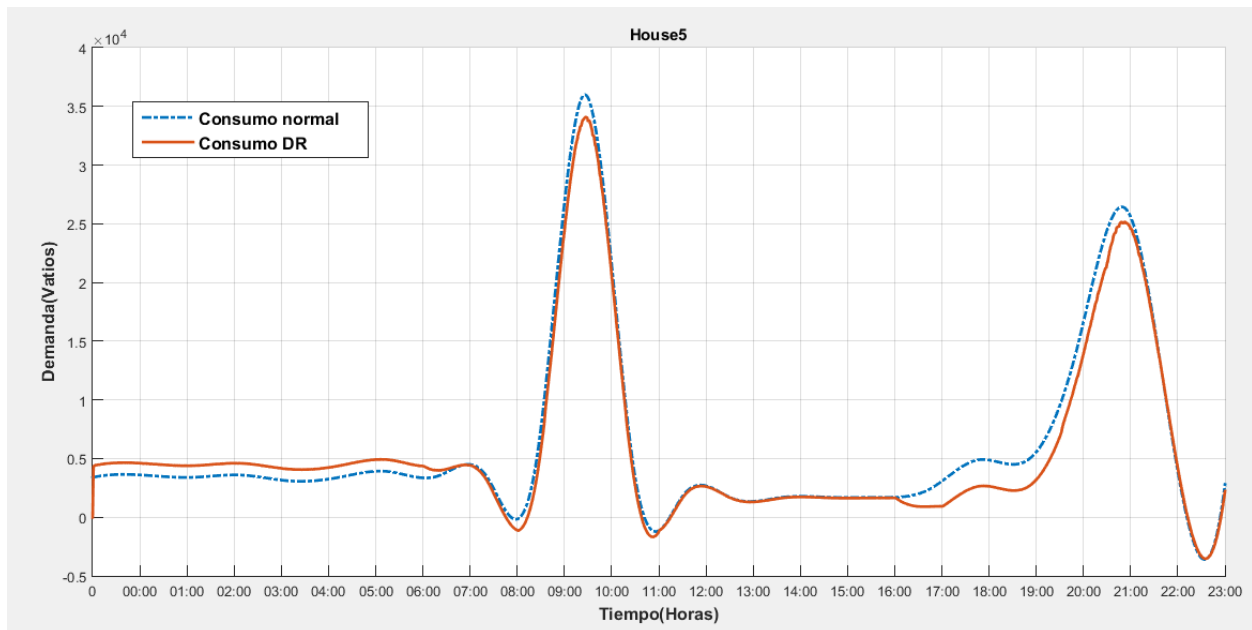
Finalmente para obtener el consumo total de las viviendas se procede a sumar el consumo de las cargas tipo HVAC con las programables. Las Figuras 4.26, 4.27 y 4.28 muestran los resultados del algoritmo de respuesta a la demanda en cada una de las tres viviendas de tipo III.



**Figura 4.26 Consumo normal y bajo las funciones de respuesta a la demanda para "House3"**

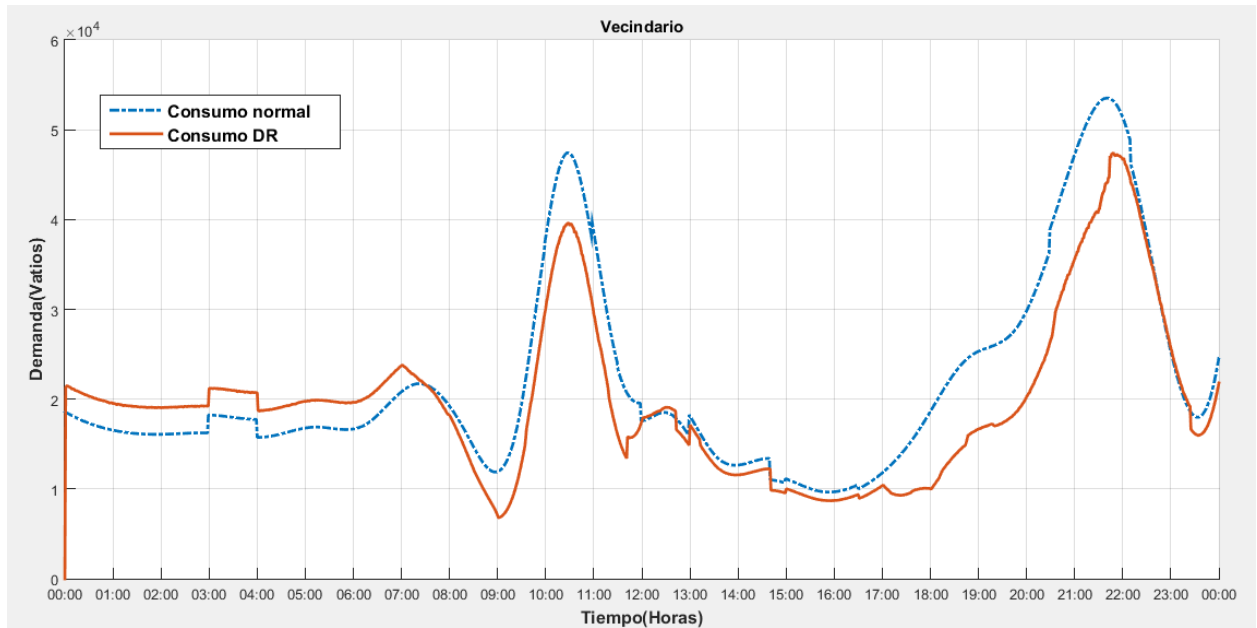


**Figura 4.27 Consumo normal y bajo las funciones de respuesta a la demanda para "House4"**



**Figura 4.28 Consumo normal y bajo las funciones de respuesta a la demanda para "House5"**

Finalmente en la Figura 4.29 se muestra el resultado total del todo el vecindario sobre el cual se han aplicado los distintos controladores difusos que hacen que los medidores inteligentes, tanto el real como los simulados, posean funciones de respuesta a la demanda, el principal objetivo de la implementación del método de respuesta a la demanda se aprecia claramente, los picos de consumo en los horarios de alta demanda sufren una significativa reducción, y este consumo eléctrico es desplazado a horarios de baja demanda, con esto se consigue un ahorro energético y un reducido impacto en el confort de los usuarios.



**Figura 4.29 Consumo normal y bajo las funciones de respuesta a la demanda para todo el vecindario**



# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES

### 5.1. Limitaciones

En el presente trabajo se ha desarrollado con éxito la construcción de un prototipo de medidor inteligente con funciones de respuesta a la demanda. Además se ha desarrollado una red eléctrica virtual sobre la cual se ha conseguido probar las funciones de respuesta a la demanda. Sin embargo, debido a que el objetivo principal del trabajo es la elaboración del prototipo, se ha procedido a simplificar ciertos aspectos a tomarse en cuenta. El más importante de estos corresponde a la comunicación entre los medidores inteligentes y la empresa proveedora, dicha comunicación se ha conseguido con una transmisión serial de datos entre el hardware y la PC sobre la cual corre la simulación. La implementación de un medidor inteligente en una red eléctrica real demanda el uso de un protocolo de comunicación robusto, confiable, seguro y capaz de responder en tiempo real a todo el conjunto de medidores inteligentes.

### 5.2. Conclusiones

Se logró diseñar y construir un prototipo de medidor para realizar pruebas de concepto, y obtener un monitoreo del consumo eléctrico. Además se realizó un sistema de control de cargas domésticas, algoritmo de respuesta a la demanda, y se creó un escenario simulado en MATLAB; con el objetivo de evaluar el desempeño del medidor inteligente envolviendo el concepto de respuesta a la demanda.

Los medidores de energía en circuito integrado son muy utilizados en el desarrollo de medidores. Existen numerosos modelos con diferentes características, funcionalidades e interfaces de comunicación. El CI ADE7753, utilizado en ésta tesis, es ampliamente utilizado en numerosas aplicaciones, su rendimiento ha cumplido con lo esperado dentro de este trabajo.

El prototipo implementado genera información digital de parámetros eléctricos como: potencia activa, voltaje RMS, corriente RMS, frecuencia, energía activa. De acuerdo con las características del medidor de energía, es posible obtener información y programar características adicionales.

Las redes inteligentes son el futuro de las nuevas redes eléctricas. Todo este escenario de redes inteligentes envuelve múltiples facetas en las cuales los medidores inteligentes cumplen un papel muy importante a la hora de proporcionar información y permitir integrar nuevos conceptos como el de respuesta a la demanda.



Los medidores inteligentes transforman el rol que tienen los consumidores de energía, pasándolos de consumidores pasivos a activos, permitiéndoles tener conocimiento del estado de la red y generar información de mucha utilidad a las empresas generadoras.

El concepto de respuesta a la demanda está siendo utilizado en la actualidad por numerosos países, debido a que logra un uso más eficiente de la energía y permite integrar numerosas funcionalidades desde el lado del consumidor. Además, logra abaratar costos y reducir demandas excesivas en horas pico que sobrecargan la red. En el presente trabajo se demostró la efectividad de los métodos de respuesta a la demanda en lo relacionado al ahorro energético, esto al lograr reducir los patrones de consumo en los hogares de manera que toda la red eléctrica reduzca la demanda de energía, esto consigue que las empresas generadoras puedan controlar la demanda y alcancen mejoramientos a nivel de consumo y económico.

### **5.3. Trabajos futuros**

Se propone dar un alcance adicional al trabajo a través de:

- Crear una red de comunicación confiable y segura para la transmisión de datos bidireccional entre la empresa generadora y los medidores inteligentes.
- Optimizar el uso del ADE7753, usando más de las características que ofrece el CI con el fin de realizar un análisis de la energía y no solo la medición de la misma.
- Agregar a las viviendas la capacidad de generar energía aprovechando con esto el flujo bidireccional de datos existente entre los usuarios y la empresa generadora.
- Crear el hardware necesario para el control de las cargas programables.
- Reducir errores sistemáticos.



# REFERENCIAS

---

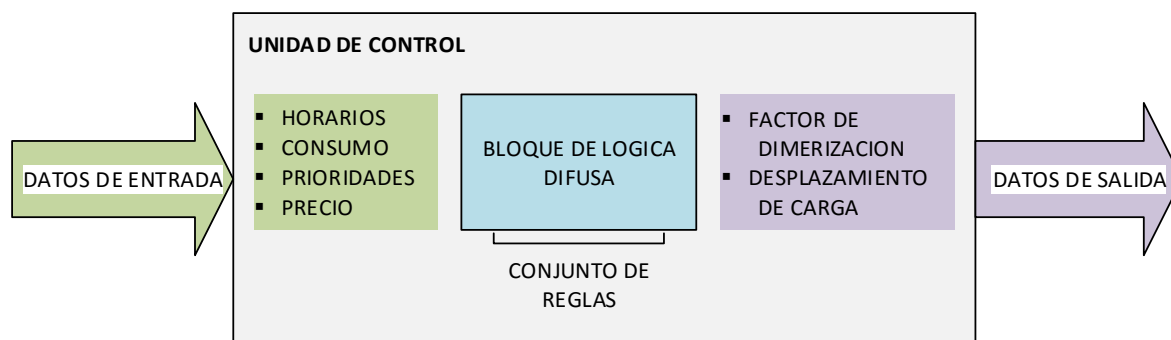
- [1] J. Huacuz and M. Jorge, "Generación eléctrica distribuida con energías renovables," *Boletín iie. Septiembre/octubre*, 1999.
- [2] K. Kuroda, R. Yokoyama, D. Kobayashi, and T. Ichimura, "An Approach to Outage Location Prediction Utilizing Smart Metering Data," in *2014 8th Asia Modelling Symposium*, 2014, pp. 61–66.
- [3] P. Palensky and D. Dietrich, "Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 7, no. 3, pp. 381–388, Aug. 2011.
- [4] P. Siano, "Demand response and smart grids - A survey," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 461–478, 2014.
- [5] K. S. . Weranga, S. Kumarawadu, and D. P. Chandima, *Smart Metering Design and Applications*. 2014.
- [6] and N. H. M. S. Q. Ali, S. D. Maqbool, T. P. I. Ahamed, "Load scheduling with maximum demand and time of use pricing for microgrids," in *c2013 IEEE Global Humanitarian Technology Conference:*, 2013, pp. 234–238.
- [7] "GHTC-SAS 2013," in *South Asia Satellite*, 2013, pp. 234–238.
- [8] S. Zhou, Z. Wu, J. Li, and X. Zhang, "Real-time Energy Control Approach for Smart Home Energy Management System," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 42, no. 3–4, pp. 315–326, Mar. 2014.
- [9] T. Logenthiran, D. Srinivasan, and T. Z. Shun, "Demand Side Management in Smart Grid Using Heuristic Optimization," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1244–1252, Sep. 2012.
- [10] L. Gelazanskas and K. A. A. Gamage, "Demand side management in smart grid: A review and proposals for future direction," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 11, pp. 22–30, Feb. 2014.
- [11] A. L.-G. Amir-Hamed Mohsenian-Rad, Vincent W.S. Wong, Juri Jatskevich, Robert Schober, "Autonomous Demand Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 320–331, 2010.



- [12] I. Atzeni, L. G. Ordonez, G. Scutari, D. P. Palomar, and J. R. Fonollosa, "Demand-Side Management via Distributed Energy Generation and Storage Optimization," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 866–876, 2013.
- [13] C. Xiang-ting, Z. Yu-hui, D. Wei, T. Jie-bin, and G. Yu-xiao, *Design of intelligent Demand Side Management system respond to varieties of factors*. IEEE, 2010.
- [14] B. M. Buchholz and Z. Styczynski, "Smart Grids Worldwide," in *Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 361–396.
- [15] Energy Department of U.S, "Smart Grids," *Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*, 2015. [Online]. Available: [http://www.smartgrid.gov/the\\_smart\\_grid](http://www.smartgrid.gov/the_smart_grid). [Accessed: 09-Oct-2015].
- [16] J. Eichhorn, "Considerations in building a smart grid communications network," 2010.
- [17] "Demand Response." [Online]. Available: <http://energy.gov/oe/technology-development/smart-grid/demand-response>. [Accessed: 09-Oct-2015].
- [18] Lem, "LEM Current transducer FHS 40-P," *Current*, pp. 1–18, 2010.
- [19] Analog Devices, "Single-Phase Multifunction Metering IC with di / dt Sensor Interface," *Communications*, 2009.
- [20] D. Mellis, "Arduino Mega 2560," *Retrieved Novemb.*, p. 2560, 2011.
- [21] A. Devices, "Evaluation Board Documentation ADE7763 Energy Metering IC," 2004.
- [22] The MathWorks, "SimPowerSystems for use with Simulink for use with Simulink," pp. 1–401, 2013.
- [23] M. M. Rahman, S. Hettiwatte, and S. Gyamfi, "An intelligent approach of achieving demand response by fuzzy logic based domestic load management," in *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2014, pp. 1–6.
- [24] PECAN STREET, "No Titl," *Dataport Home*, 2015. [Online]. Available: <https://dataport.pecanstreet.org/data/inter>.

## ANEXO A

En el capítulo 4 se detalla el escenario implementado para evaluar el desempeño del medidor. Dicho escenario consta de una red de medidores inteligentes, que implementan un algoritmo de respuesta a la demanda. Cada medidor contiene, al igual que el prototipo de medidor diseñado, una unidad de control representada por el bloque de lógica difusa, cuyo objetivo es tomar decisiones enfocadas a reducir el consumo energético de cada residencia. Estas decisiones están basadas en un conjunto de reglas, las cuales se detallan más adelante. En la Figura A.1 se muestra el esquema base de la unidad de control con los parámetros de entrada y salida requeridos. Los datos de entrada que ingresan al bloque de lógica difusa, proporcionan información de la hora, consumo en ese instante, prioridades de las cargas conectadas y el precio en ese horario, lo cuales son sometidos a un proceso de toma de decisiones basados en el conjunto de reglas implementado en el bloque de lógica difusa. Mientras más información se proporcione, más reglas deberán ser implementadas en el sistema. Sin embargo, esto provocará que la unidad de control tome decisiones más precisas, y ajustadas a la realidad. Como datos de salida, se ha dotado al sistema de un factor de dimerización y desplazamiento (Sección 4.3).



**Figura A.1 Esquema de la unidad de control**

A continuación se presentan algunas de las reglas implementadas en el bloque de lógica difusa.

- 1) *If (horario es valle) y (consumo es bajo) y (prioridad es alta) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 1)*
- 2) *If (horario es valle) y (consumo es medio) y (prioridad es alta) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 1)*
- 3) *If (horario es valle) y (consumo es alto) y (prioridad es alta) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 1)*
- 4) *If (horario es valle) y (consumo es bajo) y (prioridad es baja) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 1)*
- 5) *If (horario es valle) y (consumo es bajo) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 0.95)*





- 6) *If (horario es valle) y (consumo es medio) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 0.9)*
- 7) *If (horario es valle) y (consumo es alto) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 0.85)*
- 8) *If (horario es pico) y (consumo es bajo) y (prioridad es alta) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 0.95)*
- 9) *If (horario es pico) y (consumo es medio) y (prioridad es alta) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 0.9)*
- 10) *If (horario es pico) y (consumo es alto) y (prioridad es alta) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 0.85)*
- 11) *If (horario es pico) y (consumo es bajo) y (prioridad es bajo) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 0.9)*
- 12) *If (horario es pico) y (consumo es medio) y (prioridad es baja) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 0.85)*
- 13) *If (horario es pico) y (consumo es alto) y (prioridad es baja) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 0.8)*
- 14) *If (horario es pico) y (consumo es alto) y (prioridad es media) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 0.8)*
- 15) *If (horario es pico) y (consumo es medio) y (prioridad es alta) y (precio es alto) entonces (dimmer es 0.75)*
- 16) *If (horario es pico) y (consumo es alto) y (prioridad es media) y (precio es alto) entonces (dimmer es 0.75)*
- 17) *If (horario es moderado) y (consumo es bajo) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 0.75)*
- 18) *If (horario es moderado) y (consumo es medio) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 0.925)*
- 19) *If (horario es moderado) y (consumo es alto) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 0.875)*
- 20) *If (horario es moderado) y (consumo es bajo) y (prioridad es media) y (precio es alto) entonces (dimmer es 0.8)*
- 21) *If (horario es moderado) y (consumo es bajo) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 0.75)*
- 22) *If (horario es moderado) y (consumo es alto) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 0.875)*
- 23) *If (horario es moderado) y (consumo es medio) y (prioridad es baja) y (precio es medio) entonces (dimmer es 0.75)*
- 24) *If (horario es moderado) y (consumo es medio) y (prioridad es media) y (precio es medio) entonces (dimmer es 0.8)*
- 25) *If (horario es moderado) y (consumo es medio) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 0.925)*
- 26) *If (horario es valle) entonces (desplazar es 0)*
- 27) *If (horario es valle) entonces (desplazar es 0)*
- 28) *If (horario es moderado) entonces (desplazar es 1)*
- 29) *If (horario es pico\_am) entonces (desplazar es 1)*



30) *If (horario es pico\_pm) entonces (desplazar es 1)*

Lo expuesto anteriormente representa 30 de las 187 reglas existentes para la toma de decisiones del bloque de control encargado de dimerizar las cargas y desplazarlas. Se han escogido varios factores de dimerización, entre 0.75 y 1, con el objetivo de no afectar el confort de la residencia.

A continuación se numeran algunas de las reglas programadas en la unidad de control del medidor inteligente.

- 1) *If (horario es valle) y (consumo es bajo) y (prioridad es nula) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 100%)*
- 2) *If (horario es valle) y (consumo es bajo) y (prioridad es nula) y (precio es alto) entonces (dimmer es 100%)*
- 3) *If (horario es valle) y (consumo es bajo) y (prioridad es baja) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 80%)*
- 4) *If (horario es valle) y (consumo es bajo) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 60%)*
- 5) *If (horario es valle) y (consumo es medio) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 60%)*
- 6) *If (horario es valle) y (consumo es alto) y (prioridad es nula) y (precio es alto) entonces (dimmer es 60%)*
- 7) *If (horario es valle) y (consumo es alto) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 80%)*
- 8) *If (horario es pico\_am) y (consumo es bajo) y (prioridad es nula) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 80%)*
- 9) *If (horario es pico\_am) y (consumo es bajo) y (prioridad es nula) y (precio es alto) entonces (dimmer es 80%)*
- 10) *If (horario es pico\_am) y (consumo es bajo) y (prioridad es nula) y (precio es medio) entonces (dimmer es 80%)*
- 11) *If (horario es pico\_am) y (consumo es bajo) y (prioridad es baja) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 40%)*
- 12) *If (horario es pico\_am) y (consumo es bajo) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 40%)*
- 13) *If (horario es pico\_am) y (consumo es bajo) y (prioridad es baja) y (precio es medio) entonces (dimmer es 40%)*
- 14) *If (horario es pico\_am) y (consumo es bajo) y (prioridad es media baja) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 40%)*
- 15) *If (horario es pico\_am) y (consumo es meido) y (prioridad es nula) y (precio es bajo) entonces (dimmer es 40%)*
- 16) *If (horario es pico\_am) y (consumo es medio) y (prioridad es nula) y (precio es alto) entonces (dimmer es 40%)*
- 17) *If (horario es pico\_am) y (consumo es medio) y (prioridad es nula) y (precio es medio) entonces (dimmer es 40%)*



- 18) *If (horario es pico\_am) y (consumo es medio) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 40%)*
- 19) *If (horario es pico\_am) y (consumo es alto) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 40%)*
- 20) *If (horario es pico\_am) y (consumo es alto) y (prioridad es media baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 40%)*
- 21) *If (horario es moderado) y (consumo es bajo) y (prioridad es baja) y (precio es medio) entonces (dimmer es 40%)*
- 22) *If (horario es moderado) y (consumo es bajo) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 40%)*
- 23) *If (horario es moderado) y (consumo es bajo) y (prioridad es media baja) y (precio es medio) entonces (dimmer es 80%)*
- 24) *If (horario es moderado) y (consumo es bajo) y (prioridad es media baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 80%)*
- 25) *If (horario es moderado) y (consumo es bajo) y (prioridad es alta) y (precio es alto) entonces (dimmer es 80%)*
- 26) *If (horario es moderado) y (consumo es medio) y (prioridad es baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 40%)*
- 27) *If (horario es moderado) y (consumo es medio) y (prioridad es medio baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 60%)*
- 28) *If (horario es moderado) y (consumo es medio) y (prioridad es medio baja) y (precio es medio) entonces (dimmer es 60%)*
- 29) *If (horario es moderado) y (consumo es medio) y (prioridad es alta) y (precio es alto) entonces (dimmer es 80%)*
- 30) *If (horario es moderado) y (consumo es medio) y (prioridad es alta) y (precio es medio) entonces (dimmer es 80%)*
- 31) *If (horario es pico\_pm) y (consumo es bajo) y (prioridad es media baja) y (precio es medio) entonces (dimmer es 60%)*
- 32) *If (horario es pico\_pm) y (consumo es bajo) y (prioridad es alta) y (precio es medio) entonces (dimmer es 80%)*
- 33) *If (horario es pico\_pm) y (consumo es bajo) y (prioridad es media alta) y (precio es medio) entonces (dimmer es 80%)*
- 34) *If (horario es pico\_pm) y (consumo es bajo) y (prioridad es media alta) y (precio es alto) entonces (dimmer es 80%)*
- 35) *If (horario es pico\_pm) y (consumo es alto) y (prioridad es media baja) y (precio es alto) entonces (dimmer es 60%)*

Las reglas anteriores son 35 de las 100 reglas implementadas en el bloque de lógica difusa encargado de dimerizar las cargas del prototipo de medidor inteligente. El valor de salida, por lo tanto representa el porcentaje de dimerización de las cargas, es decir, un valor de 100 representa que las cargas HVAC están a su máximo, mientras que un valor de 40 significa que las cargas están a un 40%.